



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN *MULTI-MACHINE*
BERBASIS *SINGLE-MACHINE TO INFINITE BUS (SMIB)*
PADA SISTEM JAWA-MADURA-BALI (JAMALI) 500 KV
DENGAN METODE *POWER FLOW TRACING (PFT)***

Mohamad Arwan Efendy
NRP 07111645000010

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

***TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF MULTI-MACHINE
BASED ON SINGLE MACHINE TO INFINITE BUS (SMIB)
IN JAVA-MADURA-BALI (JAMALI) 500KV WITH POWER
FLOW TRACING METHOD***

Mohamad Arwan Efendy
NRP 07111645000010

Advisor
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

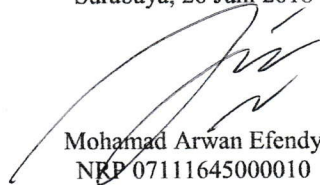
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Analisis Kestabilan Transien *Multi-Machine* Berbasis *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB) pada Sistem Jawa-Madura-Bali 500 kV dengan Metode *Power Flow Tracing***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 26 Juni 2018



Mohamad Arwan Efendy
NRP 07111645000010

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN
MULTI MACHINE BERBASIS SINGLE-MACHINE TO
INFINITE BUS (SMIB) PADA SISTEM
JAWA-MADURA-BALI (JAMALI) 500 KV DENGAN
METODE POWER FLOW TRACING (PFT)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Sistem Tenaga Listrik
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001

Dosen Pembimbing II


Dr. Eng. Rony Seto W., S.T., M.T.
NIP. 197411292000121001



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN BERBASIS
SINGLE-MACHINE TO INFINITE BUS (SMIB) PADA SISTEM
JAWA-MADURA-BALI 500 KV DENGAN METODE
POWER FLOW TRACING (PFT)**

Nama : Mohamad Arwan Efendy
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan hal sensitif yang harus di perhatikan. Salah satu jenis kestabilan pada sistem tenaga listrik yaitu kestabilan transien dengan pengamatan kestabilan sudut rotor. Sistem jaringan listrik JAMALI merupakan sistem jaringan listrik *multi-machine* dengan sistem terinterkoneksi. Dalam melakukan analisis pada sistem *multi-machine* tersebut diperlukan suatu metode yang lebih sederhana, salah satunya yaitu menggunakan metode *Power Flow Tracing* (PFT). Hasil dari PFT berupa suatu penyederhanaan sistem *multi-machine* menjadi sistem *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB). Analisis kestabilan transien dengan sistem SMIB pada tugas akhir ini menggunakan konsep *Equal Area Criterion* (EAC). Konsep EAC yaitu menentukan sudut kritis rotor dari daya elektrik yang dihasilkan oleh generator. Dari hasil EAC diperoleh nilai sudut kritis dan prediksi waktu pemutusan kritis dengan mengamati beberapa generator.

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan analisis kestabilan transien akibat gangguan hubung singkat 3 fasa terhadap tanah pada saluran Balaraja-Cikupa. Berdasarkan hasil analisis, dengan menggunakan konsep PFT dengan analisis EAC diperoleh nilai sudut pemutus kritis $94,6101^{\circ}$ dengan prediksi *time clearing* 0,0715 detik. Pada sistem *multi-machine* dengan nilai 0,07869 detik sistem dalam keadaan stabil kritis, dan untuk waktu pemutus kritis 0,08 detik, sistem tidak stabil. Berdasarkan pada hasil analisis, metode PFT dapat merpresentasikan sistem *multi-machine* dengan sistem interkoneksi.

Kata Kunci : Kestabilan Transien, *Multi-Machine*, *Power Flow Tracing* (PFT), *Equal Area Criterion* (EAC), *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB)

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS BASED ON
SINGLE-MACHINE TO INFINITE BUS (SMIB) IN
JAWA-MADURA-BALI 500 KV SYSTEM WITH
POWER FLOW TRACING (PFT) METHOD**

Name : Mohamad Arwan Efendy
Advisor : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

The stability of the electric power system is a sensitive case. One type of stability in electric power system is transient stability with rotor angle stability observation. JAMALI's electrical grid system is a multi-machine electrical network system with interconnected systems. In analyzing the multi-machine system is needed more simple method, one of them is using Power Flow Tracing method (PFT). The result of PFT is a simplification of multi-machine system into Single Machine to Infinite Bus (SMIB) system. Analysis of transient stability with SMIB system in this final project using Equal Area Criterion (EAC) concept. The EAC concept is to determine the critical angle of the rotor from the electrical power generated by the generator. From EAC results obtained the critical angle value and the prediction of critical clearing time by observing some generators.

In this Final Project, the transient stability analysis with case due to the 3 phase fault to ground on Balaraja-Cikupa line. Based on the results of analysis, using the concept of PFT with EAC analysis obtained the value of critical breaker angle 94.6101^0 with a prediction of 0.0715 seconds clearing time. In a multi-machine system with a value of 0.07869 seconds the system is in a stable critical state, and for a break time of 0.08 seconds crystals, the system is unstable. Based on the results of the analysis, the PFT method can represent a multi-machine system with an interconnect system.

Keywords : *Transient Stability, Interconnected Multi-Machine System, Power Flow Tracing (PFT), Equal Area Criterion (EAC), Single Machine to Infintite Bus (SMIB).*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

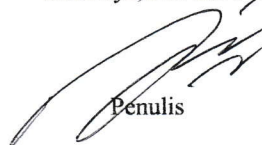
Alhamdulillah Robbil 'Alamin, segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.

Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT karena tanpa-Nya penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang Tua saya yang senantiasa memberika doa, semangat, dan motivasi agar saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T. selaku dosen pembimbing pertama yang telah bersedia memberikan saya saran untuk Tugas Akhir dan selalu memberikan bimbingan dalam mengerjakan Tugas Akhir dan membimbing untuk menyelesaikan permasalahan, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Rony Seto W., S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah selalu memberikan masukan dalam mengerjakan Tugas Akhir dan telah penulisan buku Tugas Akhir.
5. Mohamad Ridwan, S.T., M.T. yang telah bersedia memberikan ilmu dan wawasan dalam pendalaman metode *power flow tracing* (PFT) untuk Tugas Akhir.
6. Teman-teman teknik sistem tenaga lintas jalur 2016 khususnya teman-teman satu dosen pembimbing yaitu Yuangga, Hasbi, dan Imam yang selalu memberikan dukungan motivasi dan informasi dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Serta kepada semua pihak yang telah mebantu dalam masa perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir. Besar harapan penulis dalam buku Tugas Akhir ini bisa memberikan masukan dan manfaat bagi pembaca. Penulis juga berharap mendapatkan kritik dan saran yang dapat membangun agar lebih baik lagi. Terima kasih

Surabaya, Juli 2018



Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Laporan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
 BAB II DASAR TEORI	 7
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor	8
2.1.2 Kestabilan Tegangan	12
2.2 Kestabilan Transien.....	13
2.2.1 Sistem <i>Multi-Machine</i>	13
2.2.2 Sistem <i>Single Machine to Infinite Bus</i> (SMIB)	16
2.3 Persamaan Ayunan dan Dinamika Rotor	17
2.4 Konsep Dasar Hubung Singkat	21
2.3.1 Simetri	23
2.3.2 Tidak Simetri (Asimetris).....	25
2.5 <i>Power Flow Tracing</i>	27
2.5.1 <i>Power Flow Tracing</i> Daya Reaktif.....	28
2.5.2 <i>Power Flow Tracing</i> Daya Aktif.....	31

2.6	Pembentukan Sistem SMIB	33
2.6.1	Reaktansi X_a	34
2.6.2	Reaktansi Saluran X_b dan X_c	34
2.7	<i>Equal Area Criterion</i> (EAC).....	36
2.7.1	Konsep Analisis Kestabilan Transien dengan EAC	37
2.7.2	Hubungan Sudut Kritis dengan Prediksi Nilai CCT	42
2.8	Standar Kestabilan Transien	43
2.8.1	Standar Sudut Rotor	43
2.8.2	Standar <i>Critical Clearing Time</i> (CCT).....	43
BAB III DATA DAN METODOLOGI.....		45
3.1	Sistem Jaringan Listrik JAMALI 500kV	45
3.2	Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV 2019	46
3.3	Data Pembangkitan Generator Jamali pada Tahun 2019	49
3.4	Data Reaktansi, Daya Mekanis, dan Inersia.....	51
3.5	Data Beban JAMALI Tahun 2019	53
3.6	Metodologi.....	55
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS		59
4.1	Hasil Perbandingan ETAP dengan MATLAB	59
4.2	Perbandingan <i>Losses</i> ETAP & MATLAB	60
4.3	Hasil <i>Power Flow Tracing</i> Daya Aktif	67
4.3.1	Kontribusi Pembangkitan Generator	68
4.3.2	Kontribusi <i>Losses</i> PFT Daya Aktif	71
4.4	Hasil <i>Power Flow Tracing</i> Daya Reaktif.....	74
4.4.1	Kondisi <i>Steady State</i>	74
4.4.2	Kondisi <i>Post Fault</i>	80
4.5	Pembentukan SMIB.....	85
4.5.1	Saluran X_1 , X_2 , dan X_3	85
4.6	Hasil Analisis Kestabilan Transien dengan EAC.....	87
4.6.1	Generator 1	88
4.6.2	Generator 2	89
4.6.3	Generator 3	90
4.6.4	Generator 4	91
4.6.5	Generator 5	92
4.6.6	Generator 6	93
4.6.7	Generator 7	94
4.6.8	Generator 8	95

4.7 Validasi Hasil SMIB terhadap <i>Multi-Machine</i>	96
4.7.1 Pengujian <i>Multi-Machine</i> (<i>Time Clearing</i> 0,0715s)	97
4.7.2 Pengujian <i>Multi-Machine</i> (<i>Time Clearing</i> 0,07869s)	98
4.7.3 Pengujian <i>Multi-Machine</i> (<i>Time Clearing</i> 0,08 s)	99
4.8 Studi Kasus Kontingensi	101
4.8.1 Hasil <i>Single Machine to Infinite Bus</i>	101
4.8.2 Hasil <i>Multi-Machine</i>	103
BAB V PENUTUP	105
5.1 Kesimpulan	105
5.2 Saran	106
DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN A	109
A. <i>Single Line Diagram</i> JAMALI 500 kV Tahun 2019	109
RIWAYAT HIDUP PENULIS	111

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	8
Gambar 2.2 <i>Single Line Diagram</i> Generator dan Motor	9
Gambar 2.3 Diagram Impedansi Generator dan Motor	10
Gambar 2.4 Diagram Fasor Generator.....	11
Gambar 2.5 Karakteristik Kurva Daya-Sudut.....	11
Gambar 2.6 Sistem Jaringan Listrik <i>Multi-Machine</i>	14
Gambar 2.7 Representasi Jaringan SMIB Kestabilan Transien.....	17
Gambar 2.8 Ilustrasi Aliran Daya pada Generator Sinkron	19
Gambar 2.9 Fasor Sistem Tidak Seimbang (Asimetris)	23
Gambar 2.10 Fasor dan Gelombang Urutan Positif	24
Gambar 2.11 Fasor dan Gelombang Urutan Negatif	24
Gambar 2.12 Fasor dan Gelombang Urutan Nol	25
Gambar 2.13 Gangguan Satu Fasa ke Tanah	25
Gambar 2.14 Gangguan Dua Fasa ke Tanah	26
Gambar 2.15 Gangguan Antar Fasa (L-L).....	26
Gambar 2.16 Ilustrasi Bus Fiktif dari <i>Power Flow Tracing</i>	28
Gambar 2.17 Saluran SMIB Setelah Gangguan (Kondisi 2)	34
Gambar 2.18 Saluran SMIB pada Kondisi Normal (<i>Steady State</i>)	35
Gambar 2.19 SMIB dengan Gangguan Terjadi di Tengah Saluran	38
Gambar 2.20 Kurva <i>Equal Area Criterion</i>	38
Gambar 2.21 <i>Benchmark</i> SMIB Kondisi Normal (<i>Steady State</i>).....	38
Gambar 2.22 <i>Benchmark</i> SMIB Kondisi Hubung Singkat	39
Gambar 2.23 <i>Benchmark</i> SMIB Kondisi Setelah Gangguan	40
Gambar 2.24 Kurva Hubungan P dan δ	41
Gambar 3.1 Topologi Jaringan Sistem JAMALI 500 kV 2019	45
Gambar 3.2 <i>Flow Chart</i> Metodologi Analisis	55
Gambar 3.3 <i>Flow Chart</i> Program Metode <i>Power Flow Tracing</i>	57
Gambar 4.1 <i>Benchmark Single Machine to Infinite Bus</i>	85
Gambar 4.2 Hasil Simualasi EAC Sistem 1	88
Gambar 4.3 Hasil Simualasi EAC Sistem 2	89
Gambar 4.4 Hasil Simualasi EAC Sistem 3	90
Gambar 4.5 Hasil Simualasi EAC Sistem 4	91
Gambar 4.6 Hasil Simualasi EAC Sistem 5	92
Gambar 4.7 Hasil Simualasi EAC Sistem 6	93

Gambar 4.8 Hasil Simualasi EAC Sistem 7 94

Gambar 4.9 Hasil Simualasi EAC Sistem 8 95

Gambar 4.10 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t = 0,0715$ s 97

Gambar 4.11 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t = 0,07869$ s 98

Gambar 4.12 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t=0,08$ s 99

Gambar 4.13 Hasil Simulasi Sistem SMIB (Kontingensi) 102

Gambar 4.14 Hasil Kontingensi *Multi-Machine* ($t=0,0805$ s)..... 103

Gambar 4.15 Hasil Kontingensi *Multi-Machine* ($t=0,09$ s)..... 104

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV Tahun 2019	46
Tabel 3.2 Pembangkitan Generatorsor JAMALI 500KV Tahun 2019	49
Tabel 3.3 Data Reaktansi, Daya Mekanis, dan Inersia	51
Tabel 3.4 Data Beban Puncak JAMALI Tahun 2019	53
Tabel 4.1 Rekap Hasil Perbandingan ETAP dengan Matlab.....	59
Tabel 4.2 Data Perbandingan <i>Losses</i> ETAP& MATLAB	60
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Kontribusi Pembangkitan Generator	68
Tabel 4.4 Kontribusi <i>Losses</i> PFT Daya Aktif.....	71
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil PFT dan <i>Load Flow</i> Daya Aktif	73
Tabel 4.6 Kontribusi <i>Losses</i> Generator PFT Daya Reaktif Kondisi1 ...	74
Tabel 4.7 Kontribusi <i>Losses</i> Saluran PFT Daya Reaktif Kondisi1	77
Tabel 4.8 Perbandingan PFT & <i>Load Flow</i> Daya Reaktif Kondisi1	80
Tabel 4.9 Kontribusi <i>Losses</i> Generator PFT Daya Reaktif Kondisi2 ...	81
Tabel 4.10 Kontribusi <i>Losses</i> Saluran PFT Daya Reaktif Kondisi2.....	82
Tabel 4.11. Hasil Saluran X1, X2, dan X3 Sistem SMIB.....	85

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (JAMALI) merupakan salah satu sistem kelistrikan yang besar dan kompleks. Saat ini, sistem kelistrikan JAMALI telah terinterkoneksi dengan beberapa pembangkit tenaga listrik yang ada di Pulau Jawa untuk mensuplai beban-beban di Jawa, Madura, dan Bali. Sistem interkoneksi melibatkan beberapa generator yang cukup kompleks dan besar. Mengoperasikan sistem yang besar dan kompleks sangat tidak mudah. Pada saat sistem beroperasi normal maupun saat gangguan, sangat perlu dilakukan analisis kestabilan generator berdasarkan parameter kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dinyatakan sebagai kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan. Penyebab terjadinya ketidak-stabilan pada generator diantaranya yaitu dikarenakan keadaan sinkronisasi, dimana selisih daya mekanik dan daya elektrik dari generator tidak sama dengan nol. Kestabilan transien adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik seimbang atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar seperti hubung singkat, hubung terbuka, atau *loss of synchronism* dari generator[1].

Sistem *multi-machine* merupakan suatu sistem jaringan listrik yang terdiri dari beberapa generator yang saling terhubung satu sama lain atau sistem interkoneksi. Analisis kestabilan transien *multi-machine* merupakan analisis yang rumit karena melibatkan banyak generator dan bersifat non linier. Para ahli, pada umumnya menggunakan tolak ukur *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB) untuk menjelaskan fenomena kestabilan transien. Metoda yang sering digunakan adalah metoda *Equal Area Criterion* (EAC) yaitu sebuah metode yang memanfaatkan kurva daya generator pada sistem SMIB pada tiga kondisi yaitu kondisi normal, kondisi hubung singkat, dan kondisi setelah *circuit breaker* (CB) terbuka[2]. Kestabilan transien bersifat mendadak selama sekitar satu swing dengan keadaan governor dan *Automation Voltage Regulator* (AVR) belum bekerja, sehingga daya mekanik diasumsikan konstan. Hal ini bisa dikarenakan respon dari governor yang lebih lambat dari AVR[3]. Konsep SMIB ini diimplementasikan dalam sistem *multi-machine*, sehingga analisis kestabilan generator menjadi lebih sederhana. Dengan

memanfaatkan konsep aliran daya dan losses pada suatu sistem jaringan listrik yang disebut dengan *Power Flow Tracing* (PFT). PFT yang akan dibahas pada buku ini, menggunakan metode perhitungan *Extended Incidence Matrix* (EIM) yaitu matriks yang menunjukkan hubungan antara dua kelas objek sebagai penerapan hubungan kejadian antara bus dengan bus atau antara bus dengan saluran. EIM ini digunakan dalam proses pelacakan aliran daya[2]. Penerapan metode ini, diharapkan penentuan kestabilan transien pada sistem akan lebih sederhana pada suatu sistem kelistrikan *multi-machine* yang kompleks.

1.2 Permasalahan

Hal yang menjadi permasalahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Proses penyederhanaan *multi-machine* menjadi sistem *single-machine to infinite bus* berdasarkan metode *power flow tracing* dengan menggunakan nilai-nilai pembentukan dari *Extended Incidence Matrix*.
2. Pengujian atau kelayakan hasil *power flow tracing* dengan pembentukan SMIB terhadap sistem JAMALI dari hasil MATLAB (*multi-machine*)
3. Analisis kestabilan transien *single machine to infinite bus* dengan menggunakan *equal area criterion*, akibat gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan adalah MATLAB.
2. Analisis dilakukan pada sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019.
3. Gangguan yang dianalisa yaitu gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Balaraja-Cikupa dengan memperhatikan kestabilan sudut rotor pada generator.
4. Menggunakan sistem PFT dengan metode EIM dalam pendekatan terhadap SMIB.
5. Menggunakan EAC dalam menentukan kestabilan sistem.
6. Beban dan daya mekanis (Pm) diasumsikan konstan.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini:

1. Melakukan analisis kestabilan transien dengan pendekatan sistem *multi-machine* dalam penyederhanaannya menjadi *single-machine*.
2. Menguji metode PFT apakah sesuai dan layak di aplikasikan dalam sistem transmisi JAMALI.
3. Melakukan analisis kestabilan transien akibat gangguan hubung singkat 3 fasa terhadap tanah pada saluran Balraja-Cikupa terhadap sistem transmisi JAMALI 500 kV.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Persiapan dan Studi Literatur
Pada tahap awal dalam penelitian ini, dilakukan dengan mempersiapkan semua referensi dan melakukan studi literatur dengan yang berkaitan dengan penelitian terkait.
2. Pengambilan Data
Penulis akan melakukan pengambilan data yang dibutuhkan dari sistem transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019 untuk melakukan analisis transient.
3. Studi Kasus
Studi kasus terjadi akibat gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran transmisi wilayah Balaraja-Cikupa
4. Pemodelan dan Simulasi Sistem
Setelah semua data sistem kelistrikan didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem. Pada pemodelan dan simulasi, dilakukan dengan menggunakan software MATLAB dengan data-data yang telah diperoleh.
5. Analisis Data
Analisis data dilakukan dalam proses pelacakan aliran daya atau dengan melalui *Power Flow Tracing* (PFT) agar diperoleh single line diagram dalam bentuk SMIB. Dan dengan metode EAC, akan dianalisis apakah suatu system tersebut stabil atau tidak.
6. Pengujian Hasil dan Metode
Pada pengujian, akan membandingkan hasil PFT berupa hasil SMIB dengan hasil *multi-machine* pada *software* MATLAB. Pembeding *multi-machine* pada *software* MATLAB ini

merupakan *software* yang bersumber dari Hadi Saadat. Program dan sistem *multi-machine* oleh Hadi Saadat ini telah banyak digunakan dalam melakukan analisis kestabilan transien. Dengan demikian, program *multi-machine* oleh Hadi Saadat merupakan referensi untuk validasi hasil pembentukan SMIB dari hasil PFT.

7. Penarikan Kesimpulan dan Laporan

Tahap akhir untuk penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan dari pengolahan data yang diperoleh, analisis data, dan hasil yang diperoleh.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Pada bab pendahuluan, menjelaskan mengenai latar belakang pemilihan topik, perumusan masalah dan batasannya. Bab ini juga membahas mengenai tujuan penelitian, metodologi, sistematika laporan, dan relevansi dari penelitian yang dilakukan.

Bab II Dasar Teori

Pada bab ini secara garis besar akan diterangkan teori mengenai sistem kestabilan, kestabilan transien, *Power Flow Tracing* (PFT), *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB), *Equal Area Criterion* (EAC).

Bab III Metodologi dan Data

Pada bab ini membahas sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV tahun 2019 berupa data saluran transmisi, kapasitas dan pembangkitan, data pembebanan pada gardu induk, dan metodologi simulasi dengan *software* MATLAB dan ETAP. Hasil dari ETAP ini nantinya akan sebagai sumber data yang akan digunakan pada MATLAB.

Bab IV Simulasi dan Analisis

Pada bab ini dilakukan simulasi dengan *software* MATLAB terhadap proses *Power Flow Tracing* dan juga analisis kestabilan transien suatu sistem dengan metode *Equal Area Criterion*. Hasil pembentukan SMIB dari hasil PFT ini akan dibandingkan dengan sistem *multi-machine* pada *software* MATLAB.

Bab V Penutup

Pada bab ini dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran mengenai analisis kestabilan transient dengan menggunakan PFT yang telah dibahas.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan mendapatkan hasil yang dapat bermanfaat dan penggunaan PFT dengan metode EIM ini bisa digunakan sebagai referensi pada analisa selanjutnya tentang analisa kestabilan transient sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan dalam sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam keseimbangan operasi atau kemampuan untuk menjaga sistem tetap sinkron dan seimbang ketika mengalami gangguan yang tidak dapat dihindarkan. Pada sistem tenaga listrik, berdasarkan permasalahannya dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu[4]:

1. Kestabilan *Steady-State*
2. Kestabilan Transien
3. Kestabilan Dinamis

Pada sistem tenaga listrik terdapat 2 kategori gangguan yang menyebabkan permasalahan dalam kestabilan sistem, yaitu:

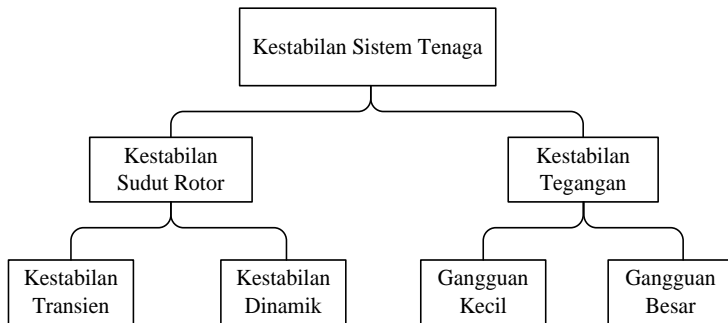
a) Gangguan Kecil

Gangguan kecil merupakan gangguan dengan perubahan beban atau pembangkitan secara acak, perlahan, dan meningkat atau menurun. Perubahan beban yang signifikan merupakan salah satu contoh dari gangguan kecil.

b) Gangguan Besar

Gangguan besar merupakan gangguan menyebabkan perubahan secara mendadak pada tegangan bus yang seharusnya langsung diatasi. Apabila tidak segera diatasi, akan mempengaruhi kestabilan sistem dengan gangguan tersebut. Selain besarnya gangguan, kestabilan sistem terpengaruh dengan panjang waktu gangguan. Contohnya yaitu adanya gangguan atau kesalahan.

Pada Gambar 2.1 berdasarkan pada objek yang di amatinya, menunjukkan bahwa stabilitas sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi beberapa aspek. Hal ini termasuk hilangnya sinkronisme antara generator sinkron (stabilitas sudut rotor) baik karena kesalahan dan gangguan besar (stabilitas transien) atau osilasi yang disebabkan oleh perubahan beban dan kurangnya redaman (stabilitas dinamis) dan untuk kestabilan tegangan dapat disebabkan oleh gangguan kecil atau gangguan besar[5].



Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik[5]

Ketidakstabilan tegangan dapat disebabkan oleh beban motor induksi besar yang menyerap sejumlah daya reaktif yang cukup besar selama kesalahan jaringan terjadi. Gangguan kecil maupun besar dapat mempengaruhi operasi sistem sinkron terhadap kestabilan sistem tenaga listrik, misalnya perubahan naik atau turunnya beban secara mendadak merupakan permasalahan gangguan berdampak pada sistem dengan signifikan. Adapun kasus permasalahan lainnya seperti *line trip*, *overload*, dan *short circuit*.

Sinkronisasi, atau kestabilan sudut rotor, dapat dibagi menjadi stabilitas dinamis dan transien. Stabilitas dinamis adalah kemampuan generator sinkron ketika beroperasi dibawah kondisi beban yang diberikan, untuk mempertahankan keadaan sinkronisasi (tanpa osilasi sudut yang berlebihan) akibat mengalami gangguan kecil, seperti perubahan terus-menerus pada beban atau pembangkitan dan *switching* pada jaringan. Stabilitas akibat gangguan besar, berkaitan dengan perubahan besar secara tiba-tiba dalam suatu jaringan, seperti yang disebabkan oleh kesalahan hubung singkat[5].

2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor

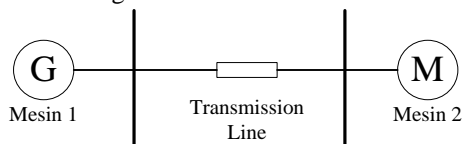
Stabilitas sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang saling terhubung dengan sistem tenaga untuk tetap dalam keadaan sinkron setelah adanya gangguan. Masalah stabilitas melibatkan studi tentang osilasi elektromekanik yang melekat pada sistem tenaga. Faktor fundamental dalam masalah ini adalah cara di mana output daya dari mesin sinkron bervariasi saat rotor berosilasi. Hal tersebut dipengaruhi dengan kemampuan menjaga atau memulihkan keseimbangan dari torsi

elektromagnetik dan torsi mekanik dalam sistem tiap mesin sinkron. Sistem yang tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya peningkatan ayunan sudut pada beberapa generator yang menimbulkan tidak sinkronisasi generator dengan generator lainnya[1].

Mesin sinkron memiliki dua elemen penting yaitu medan dan jangkar. Pada umumnya, arus medan berada pada rotor dan jangkar berada di stator. Belitan medan tertarik dengan arus searah. Ketika rotor digerakkan oleh *prime-mover* (turbin), medan magnet berputar dari belitan medan menginduksi tegangan bolak-balik dalam belitan tiga fase stator. Frekuensi, tegangan, dan arus yang dihasilkan tergantung pada kecepatan rotor. Ketika dua atau lebih generator saling terhubung, maka nilai tegangan stator dan arus dari masing-masing generator harus memiliki frekuensi dan kecepatan rotor yang sama. Oleh karena itu, rotor dari generator yang terhubung satu dengan yang lainnya harus sinkron.

Permasalahan stabilitas sudut rotor, erat kaitannya dengan studi osilasi elektromagnetik pada suatu sistem tenaga. Faktor mendasar dalam permasalahan ini yaitu adanya perubahan sudut rotor dimana output daya dari mesin sinkron bervariasi. Dalam kondisi tunak, ada keseimbangan antara input torsi mekanis dan torsi elektromagnetik output dari setiap generator, dan kecepatan tetap konstan. Jika sistem terganggu, keseimbangan ini terganggu, menghasilkan percepatan atau perlambatan rotor mesin sesuai dengan hukum gerak dari sebuah benda yang berputar. Jika satu generator sementara berjalan lebih cepat dari yang lain, maka posisi sudut rotornya relatif terhadap mesin yang lebih lambat akan maju[6]. Perbedaan sudut yang dihasilkan memindahkan sebagian beban dari mesin lambat ke mesin cepat, tergantung pada hubungan sudut-daya. Osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

Karakteristik penting yang memiliki pengaruh pada stabilitas sistem tenaga adalah hubungan antara perubahan daya dan sudut dari rotor terhadap mesin sinkron. Hubungan ini sangat nonlinear. Hal tersebut dapat di ilustrasikan dalam sistem sederhana yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut:



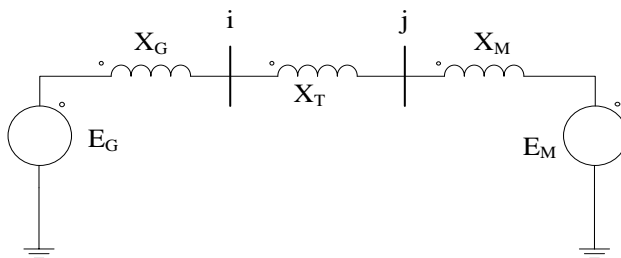
Gambar 2.2 *Single Line Diagram* Generator dan Motor[1]

Berdasarkan Gambar 2.2 merupakan *single-line* diagram generator dan motor dalam satu sistem, dimana dua mesin sinkron terhubung melalui transmisi yang mempunyai reaktansi X_L . Reaktansi X_L merupakan reaktansi induktif yang hanya diperhitungkan pada reaktansi saluran pada transmisi dari kasus ini. Karena nilai yang relatif kecil dari kapasitansi dan resistansi pada saluran, maka dapat diabaikan. Simbol G mewakili generator sinkron dan M mewakili motor sinkron. Daya yang di transfer dari generator ke motor merupakan fungsi dari sudut pemisah (δ) antara rotor dari 2 mesin. Sudut pemisah ini, disebabkan oleh tiga komponen[1]:

- Sudut *internal* generator
- Perbedaan sudut antara terminal tegangan generator dan motor
- Sudut *internal* motor

Pada kondisi medan putar stator didahului oleh rotor generator disebut dengan sudut generator internal δ_G . Sudut tegangan motor yang didahului oleh tegangan generator dinyatakan sebagai δ_L . Dan δ_L adalah sudut motor internal yang terjadi ketika medan putar stator mendahului rotor.

Gambar 2.3 menunjukkan suatu model sederhana dari suatu sistem yang bisa digunakan untuk menentukan hubungan antara daya terhadap sudut, yaitu dengan dibentuk sebagai diagram impedansi.



Gambar 2.3 Diagram Impedansi Generator dan Motor [1]

Dengan keterangan sebagai berikut:

E_M adalah tegangan motor internal

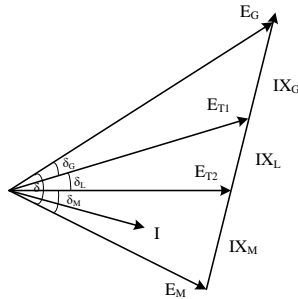
E_G adalah tegangan generator internal

X_M adalah reaktansi motor internal

X_G adalah reaktansi generator internal

X_T adalah reaktansi pada saluran

Diagram fasor mengidentifikasi hubungan antara tegangan internal generator (E_G) dan tegangan internal motor (E_M) ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Diagram Fasor Generator[1]

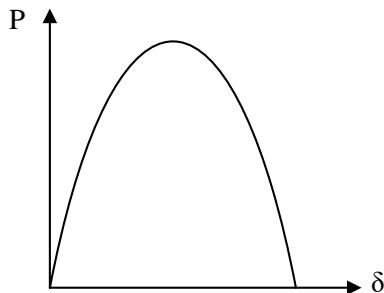
Pada Gambar 2.4, daya yang ditransfer dari generator ke motor dapat dituliskan persamaan sebagai berikut:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

dengan nilai X_T adalah reaktansi total dengan persamaan:

$$X_T = X_G + X_M + X_L \quad (2.2)$$

Hubungan antara daya terhadap sudut rotor, dapat digambarkan dalam grafik pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Karakteristik Kurva Daya-Sudut[1]

Dengan pemodelan yang ideal, digunakan untuk merepresentasikan mesin sinkron. Nilai daya yang bervariasi memiliki grafik sinus terhadap nilai sudut rotor. Berdasarkan grafik pada gambar 2.5, terlihat antara daya terhadap sudut rotor memiliki hubungan nonlinear yang sangat tinggi. Ketika sudutnya nol, tidak ada daya yang ditransfer. Saat sudutnya ditingkatkan, transfer daya meningkat hingga titik maksimum. Titik maksimum ini berlangsung hingga mencapai nominal 90° . Peningkatan lebih lanjut dalam sudut menghasilkan penurunan daya yang ditransfer. Dengan demikian terdapat nilai *steady-state* maksimum yang dapat ditransmisikan antara dua mesin. Besarnya daya maksimum berbanding lurus dengan tegangan internal mesin dan berbanding terbalik dengan reaktansi terhadap nilai tegangan[1].

2.1.2 Kestabilan Tegangan

Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan nilai tegangan di setiap bus pada kondisi abnormal maupun karena faktor adanya gangguan[1]. Sistem akan memasuki keadaan tidak stabil, ketika terjadi gangguan, peningkatan permintaan beban, dan adanya perubahan kondisi sistem jika tidak mampu mempertahankan kondisi awal yang telah ditentukan. Keadaan tersebut bergantung kepada sistem untuk dapat bertahan atau kembali pada keadaan seimbang antara suplai beban dengan permintaan beban dari sistem tenaga. Jika sistem tidak mampu mempertahankan tegangan yang ditentukan, kondisi ini akan menyebabkan penurunan performa sistem, sehingga tegangan menjadi tidak stabil. Sistem yang tidak seimbang menyebabkan terjadinya turun atau naiknya tegangan pada beberapa bus dan kerugian daya (*Losses*) pada sistem distribusi semakin besar. Dampak terburuk dari kondisi tersebut adalah terjadinya pemadaman atau *blackout* pada daerah sekitar.

Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif. Inti dari permasalahan ini biasanya berhubungan dengan drop tegangan yang terjadi pada saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi. Saat terjadi gangguan besar, tegangan akan mengalami osilasi dan terjadi ketidakstabilan sistem.

2.2 Kestabilan Transien

Stabilitas Transien adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar “*first swing*” (ayunan pertama) dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja[3]. Asumsi ini dikarenakan transien merupakan waktu sesaat yang sangat cepat, sehingga waktu dari AVR dan Governor belum bekerja. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan, tetapi waktu yang sebenarnya bergantung pada karakteristik mesin dan sistem transmisi. Setelah periode ini, governor akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4-5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif. Analisis kestabilan transien digunakan sebagai mengetahui kapabilitas sistem ketika mempertahankan keadaan transien akibat adanya gangguan besar. Beberapa gangguan besar tersebut yaitu, *loss of generation*, operasi *switching*, perubahan beban secara tiba-tiba, dan adanya kesalahan seperti hubung singkat. Analisis transien berguna untuk melakukan penentuan skema operasi rele yang dibutuhkan, waktu pemutusan kritis untuk *circuit breaker*, kapabilitas mentransfer antar sistem. Selama periode peralihan, tegangan terminal, sudut rotor dan frekuensi akan berubah. Untuk menyederhanakan studi stabilitas transien, maka terdapat beberapa asumsi diantaranya yaitu[7]:

1. Hanya sistem tiga fase yang seimbang dan gangguan seimbang yang dipertimbangkan. Oleh karena itu, hanya jaringan urutan positif yang digunakan.
2. Penyimpangan frekuensi mesin dari frekuensi sinkron (50Hz) kecil, dan arus offset dc dan harmonik diabaikan. Oleh karena itu, jaringan saluran transmisi, transformator, dan beban impedansi pada dasarnya dalam keadaan stabil.

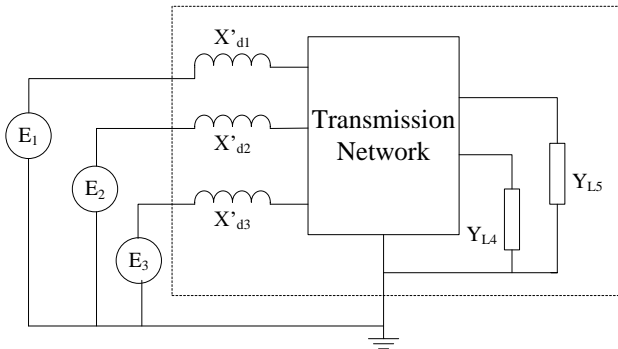
2.2.1 Sistem *Multi-Machine*

Sistem *multi-machine* merupakan suatu sistem yang terdiri dari banyak generator atau pembangkit tenaga listrik yang saling terhubung satu dengan lainnya. Pada kasus *multi-machine system*, EAC tidak dapat digunakan secara langsung dalam penentuan kestabilan suatu sistem. Pada sistem ini juga, semakin banyak generator yang terhubung dengan sistem, akan semakin kompleks perhitungannya. Sehingga, dalam kasus *multi-machine* diperlukan dua langkah awal, yaitu[8]:

1. Keadaan *steady-state* sebelum terjadinya gangguan untuk menghitung dan mengetahui aliran daya.
2. Menentukan representasi jaringan sebelum terjadinya gangguan untuk memperhitungkan pada saat terjadinya kesalahan dan setelah terjadinya kesalahan.

Dalam melakukan analisis sistem *multi-machine*, terdapat beberapa asumsi yang dilakukan untuk memudahkan dalam melakukan penyederhanaan analisis, yaitu[8]:

1. Daya masukan mekanik pada setiap generator bernilai konstan.
2. Daya redam diabaikan.
3. Masing-masing generator direpresentasikan dengan nilai raktansi $\mathbf{Xd'}$ dan nilai tegangan internal $\mathbf{E'}$ yang konstan.
4. Semua beban direpresentasikan sebagai nilai impedansi shunt ke tanah ($\mathbf{Y_{L4}}$ dan $\mathbf{Y_{L5}}$) dengan nilai yang ditentukan oleh kondisi yang berlaku segera sebelum kondisi transien.



Gambar 2.6 Sistem Jaringan Listrik *Multi-Machine* [8]

Pada sistem *multi-machine* untuk melakukan analisis kestabilan transien, perlu dilakukannya analisis aliran daya (*load flow*) untuk mengetahui nilai tegangan dan sudut fasa. Kondisi generator-generator pada saat sebelum gangguan dapat dirumuskan sebagai berikut[8]:

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.3)$$

Pada persamaan (2.3), nilai m adalah jumlah generator yang ada pada sistem, V_i adalah nilai tegangan dari generator ke- i , P_i dan Q_i merupakan daya aktif dan daya reaktif pada generator ke- i . Nilai-nilai yang tidak diketahui, ditentukan dari hasil analisis *load flow*. Resistansi jangkar pada generator dapat diabaikan dan tegangan *internal* generator dalam kondisi transien dapat dirumuskan sebagai berikut[8] :

$$E_i' = V_i + jX_d' I_i \quad (2.4)$$

Kemudian, semua beban dikonversikan menjadi persamaan admitansi dengan menggunakan hubungan:

$$y_{i0} = \frac{S_i^*}{|V_i|^2} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2} \quad (2.5)$$

Dimana nilai $P_i - jQ_i$ adalah beban dan $|V_i|$ adalah tegangan *magnitude* bus.

Persamaan beberapa generator dan sistem bus, dapat dijadikan suatu persamaan tegangan dalam bentuk matrix sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Atau

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.7)$$

Keterangan sebagai berikut[8]:

- Nilai I_{bus} merupakan vektor dari arus bus injeksi, contohnya sumber arus. Nilai arus bernilai positif, ketika aliran arus menuju ke bus dan bernilai negative jika aliran arus berlawanan atau menjauh dari bus.
- Nilai V_{bus} adalah vektor dari tegangan bus yang diukur dari referensi node (contoh tegangan node).
- Nilai Y_{bus} sebagai admitansi bus matrix. Elemen diagonal dari masing-masing node adalah jumlah dari admitansi yang terhubung pada bus tersebut dan elemen *off-diagonal* bernilai negatif dari admitansi antara *nodes*.

Dimensi dari modifikasi matriks sesuai dengan jumlah generator yang terhubung pada sistem. Aliran daya selama gangguan dan sesudah gangguan terhadap sistem jaringan dari masing-masing generator dihitung berdasarkan persamaan sudut daya.

2.2.2 Sistem *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB)

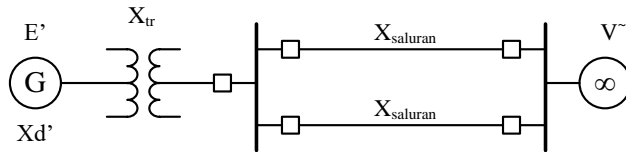
Single Machine Infinite Bus (SMIB) adalah suatu sistem satu mesin atau satu generator yang menyalurkan daya ke bus tidak terhingga (*infinite bus*). Pada SMIB, disalurkan ke bus tak hingga dikarenakan faktor jarak antara generator dengan beban-beban dianggap sangat jauh yang melalui saluran transmisi dan merepresentasikan besaran tegangan yang konstan dan frekuensi yang konstan. Untuk melakukan analisis kestabilan transien, nilai resistansi pada sistem tersebut diabaikan dan asumsi AVR & Governor *control* belum bekerja. Pada sistem SMIB, sebuah generator direpresentasikan dengan mesin tunggal (*single machine*) untuk mewakili sebuah pembangkit tenaga listrik yang terdiri dari beberapa generator pada sistem tersebut. Generator dihubungkan dengan saluran ganda melalui transformator, dengan sumber tegangan tetap, dan saluran transmisi dihubungkan dengan sebuah bus. Magnitude frekuensi dan fase tegangan diasumsikan tidak berubah dengan perubahan beban[9].

SMIB merupakan salah satu cara untuk menyederhanakan sistem *multi-machine* menjadi *single-machine*. Hal ini bertujuan untuk memudahkan dalam melakukan analisis dan perhitungan. Persamaan *multi-machine* bisa menjadi lebih sederhana dengan sistem SMIB ini. Pada sistem SMIB, jaringan transmisi untuk menyuplai beban *infinite bus*. Untuk mereduksi kompleksitas pada analisis kestabilan transien, terdapat beberapa asumsi penyederhanaan sebagai berikut[3]:

1. Masing-masing mesin sinkron direpresentasikan dengan nilai sumber tegangan konstan yang terletak di belakang dari reaktansi transien subu langsung (*direct axis*). Representasi ini mengabaikan pengaruh dari saliensi dan mengasumsikan nilai flux yang konstan.
2. Governor dianggap belum bekerja atau diabaikan dan daya masukan diasumsikan tetap selama periode simulasi.

3. Penggunaan tegangan bus sebelum gangguan untuk semua kondisi.
4. Semua beban diubah menjadi admitansi yang setara terhadap *ground* dan diasumsikan bernilai konstan.
5. Daya redam pada kondisi asinkron diabaikan.
6. Sudut rotor mekanik dari masing-masing generator berhimpitan dengan sudut tegangan dibelakang reaktansi generator.
7. Generator yang berada pada gardu yang sama berayun bersama dan dapat dikatakan selaras (*coherent*). Sekelompok generator yang selaras ini direpresentasikan sebagai satu generator yang setara.

Dengan demikian, sistem SMIB bisa direpresentasikan seperti pada gambar 2.7:



Gambar 2.7 Representasi Jaringan SMIB Kestabilan Transien[3]

Dimana nilai E' merupakan tegangan internal dengan nilai X_d' adalah nilai reaktansi generator. Nilai impedansi dari transformatorpun juga diperhitungkan dengan nilai X_{tr} . Untuk analisis stabilitas transien, di ilustrasikan dengan adanya 2 saluran transmisi yang terhubung dengan beban *infinite* (*bus infinite*). Dengan X_a , X_b , dan X_c merepresentasikan nilai reaktansi saluran transmisi. Dan untuk nilai tegangan pada *bus infinite* bernilai 1. Semua nilai dalam SMIB ini dalam satuan p.u. Dalam proses analisis kestabilan transien dilakukan analisis dalam 3 kondisi, yaitu:

1. Kondisi sebelum gangguan
2. Kondisi saat gangguan
3. Kondisi setelah gangguan

2.3 Persamaan Ayunan dan Dinamika Rotor

Pada kondisi operasi normal, posisi sudut rotor dan resultan medan magnet relatif tetap. Sudut antar keduanya merupakan sudut daya atau sudut torsi. Ketika ada gangguan, rotor akan melambat dan pada kondisi inilah mulai adanya pergerakan relatif. Persamaan yang menjelaskan tentang pergerakan relatif inilah yang disebut dengan persamaan ayunan.

Jika setelah terjadi periode osilasi, rotor mampu kembali pada kecepatan sinkron, maka generator akan tetap mempertahankan kestabilannya[3]. Jika resistansi jangkar generator dan arus bocor diabaikan, sudut antara E dan tegangan bus V, disimbolkan dengan δ yang merupakan sudut daya. Jika dalam kondisi operasi *steady state* dengan nilai *losses* diabaikan, maka persamaannya yaitu[3]:

$$T_m = T_e \quad (2.8)$$

Dimana nilai T_m adalah torsi mekanik. Ketika kondisi awal dalam keadaan *steady state* dan kemudian terjadi gangguan, sehingga membuat torsi mengalami perubahan nilai torsi, maka persamaannya menjadi[3]:

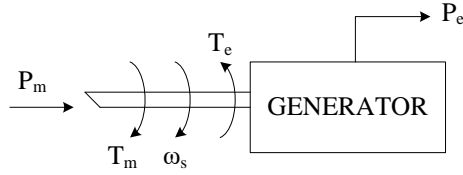
$$T_a = T_m - T_e \quad (2.9)$$

Persamaan yang mengatur gerak rotor mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa percepatan torsi adalah produk momen inersia rotor dikalikan percepatan sudutnya[10]. Pada generator sinkron, dapat dibentuk dengan persamaan berikut ini:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.10)$$

Keterangan:

- J adalah massa rotor dengan total momen inersia (kg-m^2)
- θ_m adalah rotor dengan pergeseran sudut pada sumbu tetap (radian)
- t adalah waktu (detik)
- T_a adalah percepatan pada torsi (N_m)
- T_e adalah torsi elektromagnetik atau elektrik (N_m)
- T_m adalah torsi mekanik oleh *prime mover* dan mengalami perlambatan momen putar yang dikarenakan oleh rugi-rugi putaran mekanis (N_m)
- P_m adalah daya mekanis turbin
- P_e adalah daya elektrik atau daya *output* generator



Gambar 2.8 Ilustrasi Aliran Daya pada Generator Sinkron

Pada persamaan (2.10), nilai θ_m diukur terhadap sumbu yang tetap, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron yaitu:

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.11)$$

Dimana nilai θ_m merupakan pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Dan nilai δ_m adalah posisi rotor sebelum terjadinya gangguan pada saat detik $t=0$. Turunan pada persamaan 2.11 terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.12)$$

Dengan persamaan percepatan rotor adalah

$$\alpha_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \omega_{sm} + \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.13)$$

Dengan substitusi dari persamaan (2.13) dan (2.10) maka didapatkan persamaan:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.14)$$

Pada persamaan 2.14 dikalikan dengan ω_m , maka hasilnya:

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.15)$$

Kecepatan sudut dikalikan dengan torsi akan menghasilkan daya, sehingga persamaanya menjadi:

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.16)$$

Dengan $J\omega_m$ adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor atau momen inersia yang dinyatakan dengan \mathbf{M} . Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m \quad (2.17)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.18)$$

Meskipun \mathbf{M} disebut dengan momen inersia konstan, pada kenyatannya hal tersebut tidak benar-benar konstan ketika kecepatan sudut rotor menyimpang dari kecepatan sinkron. Bila ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang maka M di evaluasi dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.19)$$

Persamaan ayunan dengan hubungannya momen inersia menjadi:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.20)$$

Jika p merupakan jumlah kutub generator sinkron maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m , maka persamaannya yaitu:

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.21)$$

Maka persamaan ayunan dalam hubungannya dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.22)$$

Ketika analisis tenaga sudah dalam satuan per unit (p.u) sistem, persamaan ayunannya pun dengan satuan p.u. Bila persamaan (2.22) dibagi dengan nilai daya dasar S_B (*Base MVA*) dan substitusi \mathbf{M} dari persamaan (2.20), akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2}{p} X \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} X \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.23)$$

Konstanta H didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi dengan rating mesin (MVA) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$H = \frac{\text{Energi Kinetik (MJ) pada Kecepatan Rating}}{\text{Rating mesin dalam MVA}} = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.24)$$

Substitusikan persamaan 2.24 kedalam persamaan 2.23 maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2H}{\omega_{sm}} x \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.25)$$

Dimana nilai $P_{m(pu)}$ dan $P_{e(pu)}$ merupakan daya mekanik dan daya elektrik. Kecepatan listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik:

$$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_s \quad (2.26)$$

Sehingga persamaannya menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_s} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) nilai ω_s merupakan percepatan sudut yang diperoleh dari $2\pi f_0$. Sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{H}{\pi f_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.28)$$

Dengan nilai δ adalah posisi angular dari rotor dalam radian yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron, persamaannya menjadi[3]:

$$\frac{H}{180 f_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.29)$$

2.4 Konsep Dasar Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan salah satu gangguan yg bisa terjadi di sistem tenaga listrik. Menurut IEC 60909, definisi hubung singkat adalah hubungan konduksi secara sengaja atau tidak sengaja melalui hambatan atau impedansi yang cukup rendah antara dua atau lebih titik yang mempunyai beda potensial. Pada kondisi operasi normal suatu sistem tenaga merupakan keseimbangan operasi *steady-state* 3 fasa. Kondisi ini, bisa terkadang terganggu oleh kejadian-kejadian yang tidak dapat dihindarkan dan tidak dapat dipastikan gangguan tersebut terjadi. Suatu

hubung singkat atau gangguan dapat terjadi jika isolasi sistem gagal, yang dikarenakan sistem tegangan lebih atau efek dari petir atau gelombang dari operasi switching, kontaminasi isolasi (polusi, dll), angin, kerusakan, pohon-pohon atau ranting yang berjatuh atau bergesekan, dan lain sebagainya. Beberapa penyebab dari hubung singkat diantaranya adalah:

1. Hubungan kontak secara langsung dengan konduktor bertegangan
2. Temperatur berlebih karena adanya arus berlebih
3. Pelepasan electron (*electron discharge*) yang merusak peralatan karena tegangan berlebih.
4. Busur/*arching* karena pengembunan bersama dengan udara, terutama pada isolator.

Pada umumnya, kesalahan tersebut memberikan arus hubung singkat maksimum yang digunakan sebagai perhitungan dasar dari sistem proteksi. Arus gangguan jika dibiarkan berlarut-larut, dapat menyebabkan kerusakan termal pada peralatan. Beberapa asumsi yang digunakan dalam analisis hubung singkat[11]:

- 1) Beban diasumsikan normal dan satuan nilai dikonversikan ke dalam satuan p.u.
- 2) Kapasitansi *line charging*, hubung shunt ke tanah diabaikan.
- 3) Semua tegangan internal sistem mempunyai magnitude dan phase sama (diasumsikan $v=1.0pu$.)
- 4) Biasanya tahanan seri dari saluran transmisi dan trafo diabaikan
- 5) Semua trafo dianggap pada posisi tap nominal
- 6) Generator, motor, trafo, dan saluran transmisi direpresentasikan dengan sumber tegangan tetap yang dihubungkan seri dengan nilai reaktansi:

a) Reaktansi Sub-Peralihan (X_d'')

Reaktansi sub-peralihan, untuk menentukan arus hubung singkat selama *cycle* pertama setelah hubung singkat. Terjadi dalam waktu 0.05 - 0.1 detik

b) Reaktansi Peralihan (X_d')

Reaktansi peralihan, untuk menentukan arus hubung singkat setelah beberapa *cycle* setelah hubung singkat. Terjadi dalam waktu 0.2 - 2 detik

c) Reaktansi sinkron (X_d)

Reaktansi Sinkron, untuk menentukan arus hubung singkat setelah keadaan *steady state* dicapai.

2.3.1 Simetri

Gangguan simetris merupakan gangguan dimana besar magnitude dari arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa. Jenis hubung singkat simetri hanya untuk hubung singkat 3 fasa dengan atau tanpa ke tanah. Gangguan Simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan pada setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:

1. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
2. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

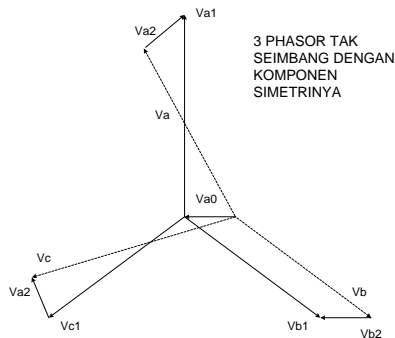
Pada perhitungan gangguan simetris, ketika gangguan simetris terjadi tidak terjadi busur dikarenakan konduktor tidak menyentuh tanah, dengan persamaan:

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_L + Z_S} \quad (2.30)$$

Keterangan:

- I_{fault} : Arus Ganggaun
- V_{source} : Tegangan sistem
- Z_S : Impedansi peralatan sistem
- Z_L : Impedansi saluran sistem

Komponen simetris merupakan metode yang dikembangkan C.L. Fortescue pada tahun 1918. Metode ini memperlakukan tiga fasa yang tidak seimbang pada sistem tenaga listrik seolah-olah sistem tersebut seimbang.

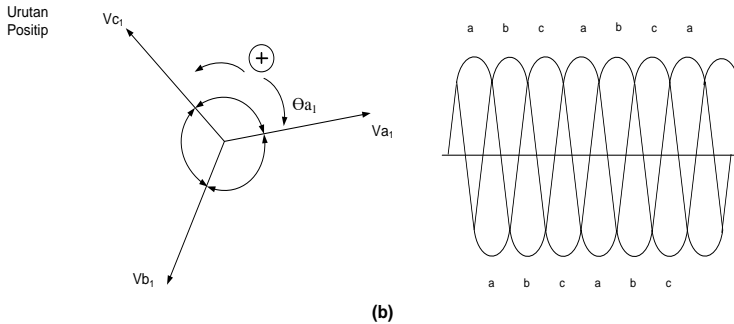


Gambar 2.9 Fasor Sistem Tidak Seimbang (Asimetris)[12]

Metode ini membuktikan bahwa sistem yang tidak simetris dapat dijabarkan menjadi tiga buah set komponen simetris. Ketiga komponen itu, yaitu [12]:

1) Urutan Positif

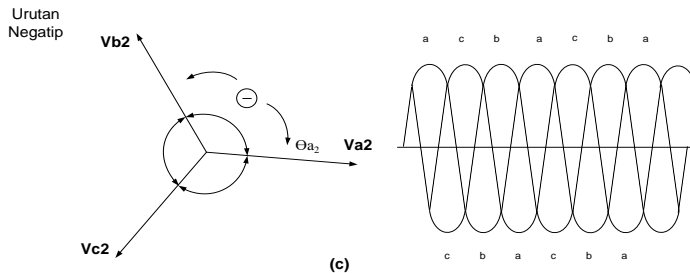
Komponen ini terdiri dari phasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar 120° . Komponen ini memiliki fasa yang sama dengan fasa sistem atau rotasi fasa positif (a-b-c). Komponen ini ditulis menggunakan indeks 1.



Gambar 2.10 Fasor dan Gelombang Urutan Positif [12]

2) Urutan Negatif

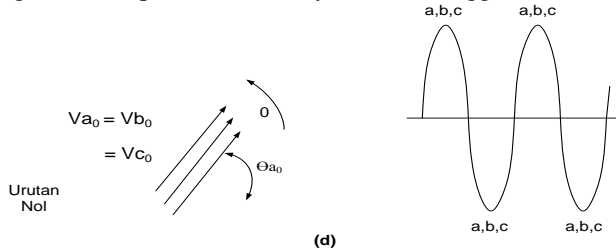
Komponen urutan negatif terdiri dari tiga phasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar 120° . Komponen ini memiliki fasa yang berkebalikan/berlawanan dengan fasor aslinya (a-c-b). Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 2.



Gambar 2.11 Fasor dan Gelombang Urutan Negatif[12]

3) Urutan Nol

Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara yang satu dengan yang lain. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 0.



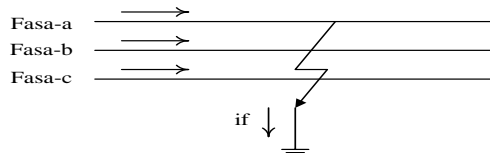
Gambar 2.12 Fasor dan Gelombang Urutan Nol[12]

2.3.2 Tidak Simetri (Asimetris)

Hubung singkat asimetris ini terjadi pada sistem 1 dan 3 fasa. Hubung singkat ini terjadi di antara konduktor berarus dengan atau tanpa ke tanah. Hubung singkat tidak simetri ini dibagi menjadi:

a) Gangguan satu fasa ke tanah (L-G)

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan asimetris, sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghubungkan-singkat semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (node) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem tiga fasa tidak seimbang dapat direpresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif dan komponen urutan nol.



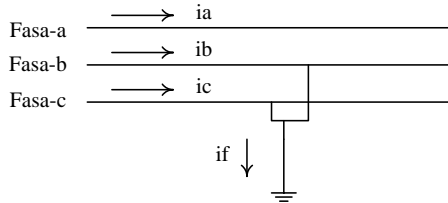
Gambar 2.13 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Persamaan satu fasa ke tanah:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.31)$$

b) Gangguan dua fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



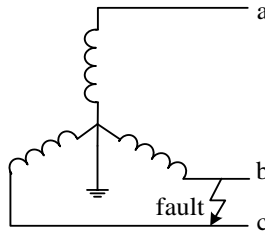
Gambar 2.14 Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Persamaan dua fasa ke tanah:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2.32)$$

c) Gangguan fasa-fasa (L-L)

Gangguan dua fasa hubung singkat terjadi ketika dua fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat.



Gambar 2.15 Gangguan Antar Fasa (L-L)

Persamaan gangguan antar fasa:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2.33)$$

2.5 Power Flow Tracing

Power flow tracing (PFT) adalah suatu metoda yang bisa digunakan untuk melacak aliran daya dari suatu generator ke beban-beban. Melalui PFT, kontribusi suatu generator ke suatu beban dan *losses* di suatu saluran dapat diketahui. Hal ini akan memudahkan analisis kestabilan suatu generator yang sedang beroperasi dalam sistem interkoneksi jika mengalami gangguan transien di salah satu busnya. Pada dasarnya, PFT digunakan untuk mereduksi sistem *Multi-Machine* menjadi *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB). Pada proses PFT terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan, diantaranya yaitu[2]:

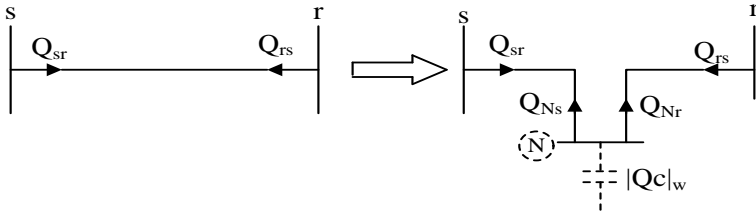
1. Menghitung aliran daya pada saat kondisi sebelum gangguan atau keadaan *steady state*. Pada saluran, nilai *losses* ditambahkan pada beban yang terhubung dengan kedua bus.
2. Dari hasil aliran daya, membentuk matriks kontribusi generator terhadap salurannya dan membentuk matriks pada saluran bus beban.
3. Menghitung invers matriks dari hasil matriks kontribusi generator dan bus beban, serta menghitung matriks faktor distribusi.
4. Menghitung daya aktif dan reaktif yang disalurkan dari generator-bus *i* menuju beban-bus *j*.

Konsep PFT didasarkan pada suatu konsep gagasan, bahwa setiap generator memiliki kontribusi pada setiap beban, sehingga dapat melacak aliran daya dari setiap generator menuju ke setiap beban. Oleh sebab itu, selain memperhatikan perhitungan distribusi daya aktif dari generator, PFT ini juga memperhatikan perhitungan daya aktif yang di ekstrak oleh beban dari generator. Selain kedua faktor tersebut, konsep perhitungan *losses* daya hasil kontribusi generator pun juga di perhatikan.

Pada suatu saluran transmisi, pastinya terdapat pengaruh dari *line charging*, *capacitor bank* sehingga menimbulkan daya reaktif. Selain itu, dari hasil pembangkitan generator pun akan menghasilkan daya reaktif dan factor sumber daya reaktif lainnya. Pada PFT, perhitungan daya reaktif sama halnya seperti pada perhitungan PFT daya aktif namun terdapat penambahan bus untuk merepresentasikan sumber daya reaktif (*line charging*) atau yang disebut dengan bus bayangan. Adanya penambahan bus, maka pemodelan matriks sistem akan menjadi lebih besar.

2.5.1 Power Flow Tracing Daya Reaktif

Dalam konsep reaktif *power flow tracing* terdapat beberapa faktor yang perlu diperhatikan, diantaranya yaitu *line charging*, *capacitor bank*, dan pembangkitan daya reaktif lainnya. Faktor-faktor tersebut akan menjadi bus bayangan atau penambahan bus untuk merepresentasikan sumber daya reaktif. Adanya bus bayangan ini, maka matriks untuk pemodelan sistem akan menjadi lebih besar. *Losses* daya reaktif dari masing-masing bus fiktif atau bus bayangan diasumsikan sama dengan setengah dari *losses* daya reaktif dari saluran asli. Dengan kata lain, pada saluran asli terdapat dua saluran yang terpisah oleh bus fiktif $(N_L + N_C)[13]$.



Gambar 2.16 Ilustrasi Bus Fiktif dari *Power Flow Tracing*[13]

Pada gambar 2.16, dapat diketahui nilai-nilai dalam pembentukan bus fiktif dengan persamaan sebagai berikut[13]:

$$Q_{sr} + Q_{Ns} = 0,5 \times |Q_{Loss}|_u \quad (2.34)$$

$$Q_{rs} + Q_{Nr} = 0,5 \times |Q_{Loss}|_u \quad (2.35)$$

$$Q_{Ns} + Q_{Nr} = |Q_C|_w \quad (2.36)$$

Dimana nilai:

$$s, r = 1, 2, \dots, N_B$$

$$u = 1, 2, \dots, N_L$$

$$w = N_B + w$$

Pembentukan Matriks Reaktif Power Flow Tracing

Proses dalam melacak aliran daya reaktif yang dihasilkan oleh sumber, langkah pertama dari algoritma yang akan dibentuk yaitu pembentukan matriks bus injeksi hasil modifikasi dengan mempertimbangkan nilai aliran daya reaktif dari masing-masing saluran. Matriks ini didefinisikan sebagai[13]:

$$[A_1]_{ij} \begin{cases} Q_{ij}, & \text{Untuk } i \neq j \text{ dan } Q_{ij} < 0 \\ [Q_s]_i - \sum_{Q_s < 0}^{N_B + N_C} Q_{ia}, & \text{Untuk } i = j \\ 0, & \text{Untuk kondisi lainnya} \end{cases} \quad (2.37)$$

Dimana nilai Q_s merupakan sumber dari daya reaktif. Jika pada saluran terdapat nilai *line charging*, maka nilai Q_s akan bersal dari sumber generator dan daya reaktif dari *line charging*. Sehingga persamaan Q_s :

$$Q_s = \begin{bmatrix} Q_G \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Pada bus beban, untuk pembentukan matriksnya, dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$Q_D = [Q_{Load}] \quad (2.39)$$

Pada persamaan (2.37), mengindikasikan bahwa nilai dari elemen baris ke-I dan kolom ke-J sama dengan nilai negatif dari daya reaktif yang mengalir pada pada saluran tersebut ($Q_{ij} < 0$). Sedangkan untuk elemen diagonal dari matriks A_1 merupakan total dari daya reaktif yang terdapat pada bus tersebut[13]. Untuk persamaan elemen diagonal dari matriks A_1 , dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A_{1(i=j)} \begin{cases} Q_s - \sum(Q_{saluran} < 0), & \text{jika Bus Generator} \\ 0 - \sum(Q_{saluran} < 0), & \text{jika Bus Beban} \end{cases} \quad (2.40)$$

Untuk membuktikan, apakah nilai dari matriks A_1 sudah benar atau tidak, bisa dikoreksi dengan cara menjumlahkan elemen baris ke-I dari matriks A_1 . Jumlah dari elemen baris ke-I dari matriks A_1 bernilai sama dengan nilai daya reaktif yang dihasilkan dari sumber (Q_s). Elemen matriks diagonal dari A_1 selalu bernilai positif.

Dalam proses pelacakan aliran daya reaktif, dibutuhkan matriks B_1 yang merepresentasi hubungan aliran daya reaktif pada bus terhadap saluran. Matriks B_1 hanya bernilai 1 atau 0, dengan persamaan sebagai berikut[13]:

$$[B_1]_{il} = \begin{cases} 1, & \text{jika } Q_{saluran-i} = Q_{ik} > 0 \\ 0, & \text{jika kondisi lainnya} \end{cases} \quad (2.41)$$

Pada persamaan (2.41), menunjukkan bahwa bernilai 1 jika terdapat aliran daya reaktif yang bernilai positif pada aliran daya bus terhadap saluran, dan selain dari persyaratan tersebut bernilai 0. Atau menunjukkan bahwa bus-i merupakan aliran daya reaktif terhadap saluran l yang bernilai positif.

Kontribusi Reaktif Power Flow Tracing

Dalam melakukan pelacakan aliran daya untuk sistem yang kompleks tidaklah mudah. Oleh sebab itu, diperlukan pembentukan matriks dengan menggunakan *Extended Incidence Matrix* (EIM), dimana EIM merupakan matriks yang menunjukkan hubungan saling keterkaitan antara bus dengan saluran. Pada proses pembentukan elemen matriks dasar untuk *reactive power flow*, diperlukan beberapa elemen matriks dalam membentuk *Distribution Factor Matrix*. Pada konsep tugas akhir yang dibahas ini, hasil dari PFT ini yang menjadikan dasar untuk pembentukan sistem SMIB.

Kontribusi reaktif *power flow tracing* ini, dapat dibentuk dari kontribusi sumber terhadap beban dan kontribusi generator terhadap nilai *losses*. Berikut merupakan persamaan yang diterapkan untuk menemukan kontribusi setiap sumber daya reaktif yang dikonsumsi oleh setiap beban atau terbuang melalui setiap cabang (*losses*):

$$E = (A_1^T)^{-1}(Q_D + B_1 Q_L) \quad (2.42)$$

Dengan nilai Q_s yang diperoleh dari elemen diagonal dari matriks A_1 , sebagai fungsi berikut:

$$Q_S = \text{diag}(Q_s)E = \text{diag}(Q_s)(A_1^T)^{-1}(Q_D + B_1 Q_L) \quad (2.43)$$

Untuk mengetahui kontribusi aliran daya reaktif dibutuhkan elemen matriks S_1 dan S_2 , dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_1 = \text{diag}(Q_s)(A_1^T)^{-1} \quad (2.44)$$

$$S_2 = S_1 B_1 \quad (2.45)$$

Setelah matriks S_1 dan S_2 telah terbentuk, maka persamaan berikut dapat digunakan untuk menentukan berapa banyak konsumsi daya reaktif dari beban (r) terhadap sumber pada bus- i [13]:

$$Q_{\text{source}-i} \rightarrow \text{Load}-r = [S_1]_{ir} [Q_D]_r \quad (2.46)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B + N_C)$ dan nilai $r = 1, 2, \dots, N_B$

dan untuk kontribusi sumber pada bus i terhadap kerugian reaktif dari saluran juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut [13]:

$$Q_{\text{source}-i} \rightarrow \text{Loss}-j = [S_2]_{ij} [Q_L]_j \quad (2.47)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B + N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L + N_C)$

Dimana nilai S_2 merupakan matriks pembentukan dari persamaan (2.45) dan untuk nilai Q_L merupakan nilai *losses*. Untuk menghitung nilai kontribusi *losses* oleh masing-masing generator, ada beberapa syarat kondisi, diantaranya yaitu[13]:

1. Jika pada saluran tidak memiliki nilai *line charging*, pada kasus ini merupakan saluran trafo. Persamaannya yaitu:

$$Q_{source-i} \rightarrow_{Loss-j} = [S_2]_{ij}[Q_L]_j \quad (2.48)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B+N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L+N_C)$

2. Jika pada saluran memiliki nilai *line charging*, maka persamaannya menjadi:

$$Q_{source-i} Q_{source-i} \rightarrow_{Loss-j} = \sum [S_2]_{ij}[Q_L]_j \quad (2.49)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B+N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L+N_C)$

Pada kondisi ini, kontribusi *losses* merupakan total dari nilai kontribusi generator-i yang mengalir pada saluran j.

2.5.2 Power Flow Tracing Daya Aktif

Pada sistem tenaga listrik, konsep *Incidence Matrix* (IM) bisa digunakan dalam merepresentasikan hubungan antar bus ataupun dari bus terhadap saluran. Pengembangan konsep IM yaitu *Extended Incidence Matrix* (EIM) diterapkan dalam melakukan pelacakan aliran daya. Dalam pembentukan matriks EIM, rugi-rugi (*losses*) dari saluran transmisi dimodelkan sebagai beban ekuivalen dan dipindahkan ke kedua bus terminal dari saluran[2]. Dengan demikian, aliran daya akan menjadi konstan dengan arah aliran tertentu. Konsep pemodelan seperti ini merupakan representasi dari jaringan sistem tanpa *losses* atau *Loseless Power Network* (LPN).

EIM dari suatu sistem LPN dapat dirumuskan kedalam matriks A dengan dimensi $n \times n$, dimana n merupakan jumlah bus dari suatu sistem tenaga listrik. Aliran daya aktif dari bus-i menuju ke bus-j dapat dituliskan dengan P_{ij} , sedangkan total aliran daya yang masuk menuju bus-i dituliskan dengan P_{Ti} . Elemen matriks $A=(a_{ij})_{n \times n}$ dapat dirumuskan sebagai berikut[14]:

$$a_{ij} \begin{cases} -P_{ij} , \text{ untuk } i \neq j \text{ dan } P_{ij} > 0 \\ 0 , \text{ untuk } i \neq j \text{ dan } P_{ji} > 0 \\ P_{Ti} , \text{ untuk } i = j \end{cases} \quad (2.50)$$

Dimana nilai $P_{Ti} = \sum_{k=0, k \neq i}^n P_{ki} + P_{Gi}$

Berdasarkan persamaan 2.50, a_{ij} merupakan representasi dari total aliran daya aktif yang masuk pada bus- i , termasuk juga output dari generator yang terhubung dengan bus- i dan aliran daya dari bus lain yang menuju ke bus- i .

Pada matriks A , untuk membuktikan validasi hasil bisa dilakukan dengan cara menjumlahkan seluruh elemen pada setiap baris dari matriks A . Hasilnya yaitu sama dengan vektor beban daya aktif (P_L). Selain itu, cara validasi yang lainnya yaitu dengan menjumlahkan seluruh elemen dari tiap kolom pada matriks A . Hasilnya yaitu sama dengan vektor daya keluaran generator (P_G).

Pemodelan Power Flow Tracing Daya Aktif

Dalam pemodelan PFT ini, dibutuhkan elemen matrik P_{GG} . Dimana nilai P_{GG} merupakan matriks diagonal dari masing-masing generator (P_G). Secara matematis:

$$P_{GG} = \text{diag}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}) \quad (2.51)$$

Dengan demikian, diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$P_G = P_{GG} \cdot A^{-1} \cdot P_L \quad (2.52)$$

Pada persamaan 2.52, menjelaskan hubungan antara P_G dan P_L yang mengindikasikan distribusi dalam aliran daya antara generator dengan beban. Dengan demikian matriks *Distribution Factor Matrix* (DFM) yang dinotasikan dengan matriks K dapat dibentuk dengan persamaan berikut[14]:

$$K = P_{GG} \cdot A^{-1} \quad (2.53)$$

Konsep PFT didasarkan pada suatu gagasan yang menyatakan bahwa setiap generator memiliki kontribusi pada setiap beban, sehingga dengan konsep PFT ini, kita dapat melacak aliran daya dari setiap generator menuju ke setiap beban. Dengan berdasarkan pada konsep EIM dari hasil ekstraksi daya aktif yang diserap oleh beban dari suatu generator memiliki persamaan sebagai berikut[14]:

$$P_L = P_{LL} (A^{-1})^T P_G \quad (2.54)$$

Dimana $P_{LL} (A^{-1})^T$ merupakan matriks faktor distribusi daya aktif dari generator ke suatu beban.

Kontribusi Pembebanan dan Losses

Kontribusi aliran daya aktif dari generator pada bus-i menuju beban pada bus-j dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$P_{i \rightarrow j} = \mathbf{K}_{i \rightarrow j} P_{Lj} \quad (2.55)$$

Pada DFM, dapat dibuktikan dengan cara menjumlahkan seluruh elemen pada setiap kolom dari matriks \mathbf{K} bernilai sama dengan 1.

Untuk menghitung nilai kontribusi *losses* suatu generator terhadap sistem, mempertimbangkan nilai dari DFM terhadap *losses* sistem *multi-machine*. Kontribusi *losses* dihasilkan dari kontribusi dari bus-i terhadap saluran s-t, sehingga didapat rumus sebagai berikut:

$$P_{Loss_{i \rightarrow s-t}} = K_{p-i \rightarrow s} Loss_{s-t} \quad (2.56)$$

Dimana nilai

$$Loss_{s-t} = P_{st} + P_{ts} \quad (2.57)$$

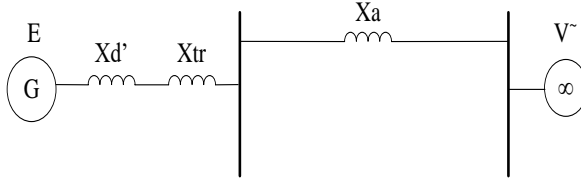
$P_{Loss_{i \rightarrow s-t}}$ adalah *losses* dari generator bus-i terhadap saluran s-t
 P_{st} adalah daya aktif dari bus s menuju ke bus t dari analisa aliran daya
 P_{ts} adalah daya aktif dari bus t menuju ke bus s dari analisa aliran daya

2.6 Pembentukan Sistem SMIB

Dalam proses pembentukan sistem *multi-machine* menjadi sistem *single machine to infinite bus* (SMIB) diperoleh dari dua kondisi. Kondisi pertama yaitu kondisi sistem pada saat normal atau *steady state*. Pada kondisi pertama, diperoleh nilai saluran X_b dan X_c pada sistem SMIB. Sedangkan untuk kondisi kedua yaitu pada saat sistem mengalami gangguan. Pada kondisi ini, *circuit breaker* pada saluran yang terjadi hubung singkat akan bekerja sehingga saluran tersebut menjadi lepas dari sistem. Pada kondisi ini dapat diperoleh nilai X_a . Kedua kondisi tersebut juga dilakukan untuk proses *power flow tracing* untuk merepresentasikan sistem *multi-machine*. Berdasarkan hasil *power flow tracing*, parameter-parameter inilah yang merepresentasikan sistem *multi-machine* berbasis *single machine to infinite bus* (SMIB) dengan menggunakan metode *power flow tracing* (PFT). Sedangkan untuk parameter X_G dan X_{TR} sesuai dengan kondisi atau nilai yang ada tanpa ada perubahan sedikitpun. Pada sistem SMIB dalam analisis kestabilan transien, parameter-parameter tersebut terhubung dengan *infinite bus*.

2.6.1 Reaktansi X_a

Nilai reaktansi saluran X_a diperoleh dari hasil pelacakan aliran daya pada kondisi setelah gangguan di isolir, artinya saluran X_b dan X_c terbuka. Pada sistem *multi-machine*, kondisi ini bisa dilakukan dengan cara memutus saluran yang terjadi hubung singkat terhadap sistem.



Gambar 2.17 Saluran SMIB Setelah Gangguan (Kondisi 2)

Pada saat kondisi CB pada saluran X_b dan X_c terbuka, maka dapat menghitung nilai X_a dengan persamaan sebagai berikut[2]:

$$X_a = \frac{Q_{Loss}}{I_g^2} \quad (2.58)$$

$$X_a (p.u) = \frac{Q_{Loss}/MVA_{base}}{I_g (p.u)^2} \quad (2.59)$$

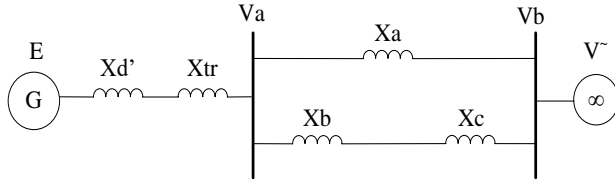
Dimana nilai Q_{Loss} merupakan kontribusi *losses* daya reaktif total seluruh jaringan terhadap generator yang akan dianalisis. Q_{Loss} ini diperoleh dari hasil *Power Flow Tracing* daya reaktif. Dan untuk nilai I_g merupakan arus *output* generator yang akan dianalisis dari aliran daya pada sistem *multi-machine*. Persamaan untuk nilai I_g sebagai berikut:

$$I_g = \frac{S}{V_g} \quad (2.60)$$

$$I_g (p.u) = \frac{P_{gen}/MVA_{base} + Q_{gen}/MVA_{base}}{V_{gen} (p.u)} \quad (2.61)$$

2.6.2 Reaktansi Saluran X_b dan X_c

Menghitung besaran nilai X_a & X_b pada sistem SMIB, dilakukan pada saat sistem kondisi normal atau *steady state*. Kondisi ini, penulis sebut dalam kondisi 1. Sistem ini bisa digambarkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Saluran SMIB pada Kondisi Normal (*Steady State*)

Pada saat kondisi normal, didapatkan persamaan[2]:

$$X_a // (X_b + X_c) = \frac{QLoss}{I_g^2} \quad (2.62)$$

$$\frac{X_a(X_b + X_c)}{X_a + X_b + X_c} = \frac{QLoss}{I_g^2} \quad (2.63)$$

$$I_2 = \frac{V_a - V_f}{X_b} \quad (2.64)$$

$$I_3 = \frac{V_f - V_b}{X_c} \quad (2.65)$$

Dengan nilai V_f merupakan tegangan pada bus yang terjadi hubung singkat. Pada kasus hubung singkat balaraja-cikupa, nilai $V_f = 0.9774$ p.u. Jika $I_2 = I_3$

$$\frac{V_a - V_f}{X_b} = \frac{V_f - V_b}{X_c} \quad (2.66)$$

$$V_b = V_f - \frac{X_c(V_a - V_f)}{X_b} \quad (2.67)$$

Jika $I_1 + I_3 = I_L$ dan $I_1 + I_2 = I_L$

$$\frac{V_a - V_b}{X_a} + \frac{V_a - V_f}{X_b} = I_g \quad (2.68)$$

$$X_b(V_a - V_b) + X_a(V_a - V_f) = I_g(X_a X_b) \quad (2.69)$$

Substitusi persamaan (2.67) ke dalam persamaan (2.69)

$$\frac{X_a X_b}{X_a + X_b + X_c} = \frac{V_a - V_f}{I_g} \quad (2.70)$$

Substitusi Persamaan (2.70) dengan Persamaan (2.63)

$$\frac{X_a X_c}{X_a + X_b + X_c} = \frac{QLoss}{I_g^2} - \left(\frac{V_a - V_f}{I_g} \right) \quad (2.71)$$

Dari persamaan (2.71) dapat dijabarkan menjadi persamaan berikut:

$$X_b \left[X_a - \left(\frac{V_a - V_f}{I_g} \right) \right] - \left[\left(\frac{V_a - V_f}{I_g} \right) \right] X_c = \left[X_a \left(\frac{V_a - V_f}{I_g} \right) \right] \quad (2.72)$$

Nilai X_a diperoleh pada kondisi setelah CB terbuka atau kondisi 2, dan dengan asumsi persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{(V_a - V_f)}{I_g} \quad (2.73)$$

$$B = \frac{QLoss}{I_g^2} \quad (2.74)$$

Untuk persamaan B, nilai dari $QLoss$ dan I_g diperoleh dari kondisi normal atau *steady state*. Nilai $QLoss$ diperoleh dari hasil *Power Flow Tracing* kontribusi *losses* daya reaktif. Dengan asumsi demikian, maka persamaannya menjadi:

$$\begin{bmatrix} X_a - A & -A \\ A - B & X_1 + A - B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AX_a \\ (B - A)X_a \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

$$\begin{bmatrix} X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a - A & -A \\ A - B & X_1 + A - B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A.X_a \\ (B - A)X_a \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Dalam proses pembentukan SMIB ini, langkah yang harus dilakukan pertama kali yaitu *running* kondisi kedua untuk memperoleh nilai X_a . Dan kemudian melakukan proses *running* kondisi normal untuk memperoleh nilai X_b dan X_c pada sistem SMIB.

2.7 Equal Area Criterion (EAC)

Studi stabilitas transien melibatkan penentuan apakah sinkronisasi dapat dipertahankan setelah mesin mengalami gangguan besar. Gangguan yang besar pada generator sinkron, dapat menyebabkan suatu sistem berosilasi. Pada sebagian besar gangguan, dapat menyebabkan osilasi yang sedemikian besarnya, sehingga linierisasi tidak diperbolehkan dan persamaan ayunan nonlinier harus dipecahkan.

Metode EAC dapat digunakan untuk prediksi dalam menentukan nilai *critical clearing time* dari sudut kritis yang diperoleh dari hasil EAC. Dengan metode EAC ini juga dapat menentukan apakah mesin mampu mempertahankan kestabilannya setelah terjadinya gangguan. Metode ini

hanya berlaku untuk sistem satu mesin yang terhubung ke bus tak hingga (SMIB).

Pada sistem SMIB, memperhitungkan parameter internal generator (E). Parameter tegangan internal generator (E) digunakan dalam menentukan nilai daya output elektrik pada generator (Pe). Persamaan dalam menentukan nilai internal generator yaitu:

$$E = V \sim + I_g (R_e + j(X_e + X_d')) \quad (2.77)$$

Konsep ini merupakan konsep pendekatan *multi-machine* terhadap SMIB, sehingga nilai dari R_e dan X_e tidak lepas dari hasil *power flow tracing* (PFT). Nilai I_g , R_e dan X_e diperoleh dari kondisi *steady state* dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_e = \frac{P_e / MVA \text{ base}}{I_g^2} \quad (2.78)$$

$$X_e = \frac{Q_e / MVA \text{ base}}{I_g^2} \quad (2.79)$$

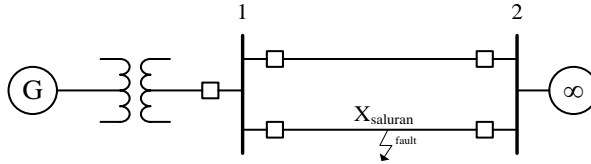
Nilai P_e merupakan kontribusi *losses* daya aktif yang telah diperoleh dari hasil kontribusi *losses* pada *power flow tracing* daya aktif dan nilai Q_e merupakan kontribusi *losses* daya reaktif dengan kondisi normal.

2.7.1 Konsep Analisis Kestabilan Transien dengan EAC

Konsep ini menerapkan konsep dasar pada persamaan ayunan dan kurva hubungan daya (P) terhadap sudut rotor dengan sistem SMIB. Penerapan konsep ini, dapat dilakukan ketika kondisi area luasan percepatan dan kecepatan pada sudut rotor berimbang, pada sudut kritis, seperti pada persamaan berikut:

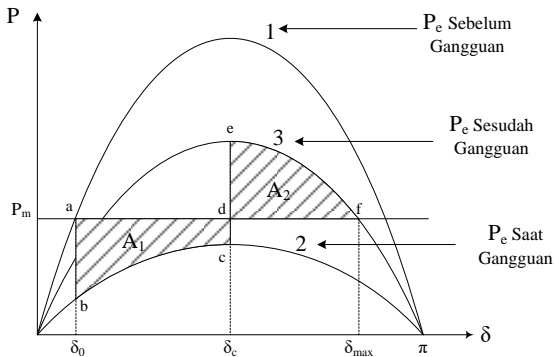
$$|Area A1| = |Area A2| \quad (2.80)$$

Pada kondisi persaan $|Area A1| = |Area A2|$ (2.80) inilah yang disebut sebagai *equal area criterion*. Sudut rotor yang akan berosilasi bolak-balik antara sudut δ_0 dan δ_{max} yang berlangsung pada frekuensi dasar. Pada kondisi inilah, dapat diketahui besaran sudut kritis yang dapat menentukan sistem tersebut stabil ataukah tidak jika terjadi gangguan hubung singkat.



Gambar 2.19 SMIB dengan Gangguan Terjadi di Tengah Saluran

Pada Gambar 2.19 merupakan kondisi saat gangguan berada pada jarak antar bus atau bisa jadi pada tengah saluran. Diasumsikan bahwa nilai daya input P_m konstan dan generator beroperasi pada kondisi *steady state* sebelum terjadinya gangguan, dengan sudut daya δ_0 . Ilustrasi ini, bisa digambarkan pada Gambar 2.20.

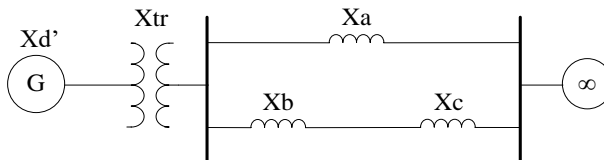


Gambar 2.20 Kurva *Equal Area Criterion*

Pada Gambar 2.20 terdapat 3 bentuk kurva yang masing-masing terdiri dari:

1. Kondisi Normal (*Steady State*)

Pada kondisi ini, rangkaian ekivalen yang terjadi terlihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Benchmark SMIB Kondisi Normal (*Steady State*)

Berdasarkan pada rangkaian ekivalen, bisa di ketahui nilai reaktansi sebelum gangguan (X_1), yaitu dengan rumus:

$$X_1 = X_d' + X_{tr} + \left(\frac{(X_b + X_c) \times X_a}{X_a + X_b + X_c} \right) \quad (2.81)$$

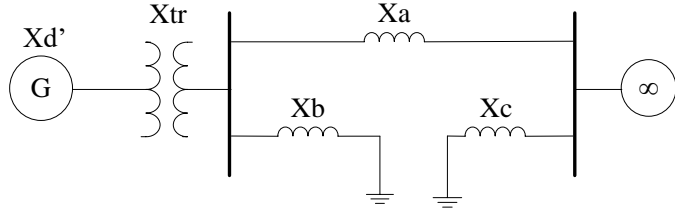
Sedangkan untuk nilai $Pe1_{max}$, diperoleh dari rumus:

$$P_{e1 max} = \frac{|E||V|}{X_1} \quad (2.82)$$

$$P_{e1} = P_{e1 max} \times \sin \delta \quad (2.83)$$

2. Kondisi Saat Terjadinya Hubung Singkat

Pada kondisi ini, rangkaian ekivalen yang terjadi terlihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Benchmark SMIB Kondisi Hubung Singkat

Pada Gambar 2.22., terlihat bahwa saat terjadinya hubung singkat, reaktansi X_b terhubung secara langsung ke tanah. Dengan demikian, nilai dari X_c tidak diperhitungkan. Secara ringkasnya, berdasarkan pada rangkaian ekivalen, bisa di ketahui nilai reaktansi pada saat terjadinya hubung singkat (X_2), yaitu dengan rumus:

$$X_2 = \frac{((X_d' + X_{tr}) \times X_b) + (X_a \times X_b) + ((X_d' + X_{tr}) \times X_a)}{X_b} \quad (2.84)$$

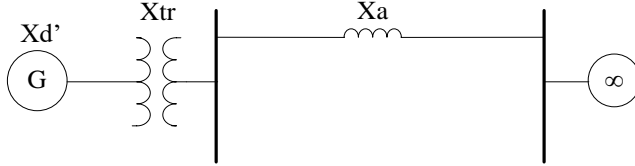
Sedangkan untuk nilai $Pe2_{max}$, diperoleh dari rumus:

$$P_{e2 max} = \frac{|E||V|}{X_2} \quad (2.85)$$

$$P_{e2} = P_{e2 max} \times \sin \delta \quad (2.86)$$

3. Kondisi Setelah Terjadinya Hubung Sigkat

Pada kondisi ini, rangkaian ekivalen yang terjadi terlihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Benchmark SMIB Kondisi Setelah Gangguan

Pada Gambar 2.23, terlihat bahwa saat setelah terjadinya hubung singkat, *Circuit Breaker* terbuka. Sehingga, nilai reaktansi total pada kondisi ini, dapat dihitung secara seri. Nilai dari X_b dan X_c tidak diperhitungkan, karena CB telah terbuka. Artinya, gangguan hubung singkat telah di isolir dan tidak ada aliran daya yang mengalir pada X_b dan X_c . Secara ringkasnya, berdasarkan pada rangkaian ekivalen, bisa di ketahui nilai reaktansi pada saat setelah terjadinya hubung singkat atau setelah gangguan dapat diisolir (X_3), yaitu dengan rumus:

$$X_3 = X_d' + X_{tr} + X_a \quad (2.87)$$

Sedangkan untuk nilai P_{e3max} , diperoleh dari rumus:

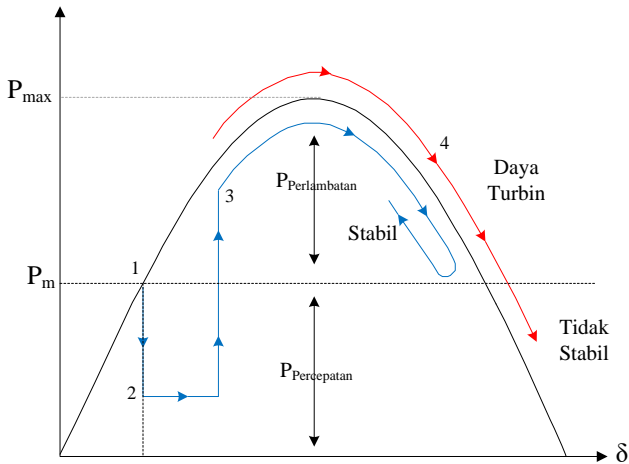
$$P_{e3 \max} = \frac{|E||V|}{X_3} \quad (2.88)$$

$$P_{e3} = P_{e3 \max} \times \sin \delta \quad (2.89)$$

Berdasarkan pada kondisi hasil EAC pada Gambar 2.20, untuk menentukan nilai sudut kritis dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\cos \delta_c = \frac{P_m(\delta_{\max} - \delta_0) + P_{3 \max} \cos(\delta_{\max}) - P_{2 \max} \cos(\delta_0)}{P_{3 \max} - P_{2 \max}} \quad (2.90)$$

$$\delta_c = \cos^{-1} \left(\frac{P_m(\delta_{\max} - \delta_0) + P_{3 \max} \cos(\delta_{\max}) - P_{2 \max} \cos(\delta_0)}{P_{3 \max} - P_{2 \max}} \right) \quad (2.91)$$



Gambar 2.24 Kurva Hubungan P dan δ

Pada Gambar 2.24 kurva hubungan P dan δ memperlihatkan respon generator pada 3 kondisi, yaitu pada kondisi normal, pada saat terjadi gangguan, dan setelah gangguan atau saat kondisi *circuit breaker* telah terbuka. Terdapat empat titik kerja pada kurva hubungan P dan δ , sebagai berikut:

1. Pada titik nomor 1 ini merupakan kondisi normal sebelum adanya gangguan hubung singkat, pada kondisi ini, generator masih bekerja dengan stabil.
2. Pada titik nomor 2 ini merupakan kondisi pada saat terjadinya gangguan yang mengakibatkan daya elektrik yang dihasilkan oleh generator menurun sangat drastis. Selisih antara daya keluaran elektrik yang dihasilkan oleh generator dengan daya mekanis pada turbin mengalami percepatan pada rotor generator. Hal ini menyebabkan perubahan pada sudut rotor atau daya yang dihasilkan generator semakin meningkat.
3. Pada titik nomor 3 ini merupakan suatu kondisi dari akhir gangguan atau saat gangguan selesai dihilangkan. Pada kondisi ini, daya yang dihasilkan oleh generator dapat pulih kembali dengan nilai yang sama dengan kurva P dan δ .

4. Pada titik nomor 4 ini merupakan suatu kondisi setelah gangguan, dimana gangguan telah di isolir atau pada saat CB telah terbuka. Pada keadaan ini, daya keluaran elektrik yang dihasilkan oleh generator menjadi lebih besar dari daya mekanik pada turbin (P_m). Keadaan ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator.

Apabila memiliki torsi lawan yang cukup pada saat kondisi setelah gangguan hilang yang mampu mengimbangi percepatan pada saat terjadinya gangguan, maka generator dapat mempertahankan kestabilannya sesudah ayunan pertama serta mampu kembali pada titik operasi kerjanya, yaitu sekitar setengah detik. Apabila kopel lawan tidak memiliki torsi yang cukup untuk melawan adanya percepatan, maka sudut rotor atau daya dapat terus membesar, sehingga menyebabkan generator tidak sinkron terhadap sistem atau bahkan bisa membuat generator lepas dari sinkronisasi.

2.7.2 Hubungan Sudut Kritis dengan Prediksi Nilai CCT

Dengan dasar dari persamaan ayunan dan sudut kritis dari hasil EAC, maka dapat diperoleh persamaan untuk menentukan prediksi nilai dari waktu pemutus kritis. Mempertimbangkan mesin sinkron yang terhubung dengan *infinite bus*, persamaan ayunan dengan asumsi nilai redaman diabaikan, yaitu[3]:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.92)$$

Untuk menghitung prediksi waktu pemutus kritis, harus menyelesaikan persamaan ayunan non-linier. Pada kasus tertentu, dimana nilai daya elektrik (P_e) saat gangguan bernilai nol. Kondisi ini bisa terjadi, dikarenakan pada saat terjadi hubung singkat, semua aliran daya menuju ke titik hubung singkat terhadap tanah. Sehingga, daya elektrik yang tersalurkan pada saat kondisi hubung singkat bernilai nol. Dengan demikian, solusi dari analisis untuk prediksi nilai waktu pemutus kritis bisa ditentukan. Persamaan ayunan yang terdapat pada sub-bab 2.3. Pada persamaan (2.92), dengan kondisi saat terjadi hubung singkat (P_e=0) menjadi:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \quad (2.93)$$

Atau menjadi

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_m \quad (2.94)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.94), sehingga menjadi:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_m \int_0^t dt = \frac{\pi f_0}{H} P_m t \quad (2.95)$$

Dan persamaan (2.95) di integral lagi, agar mendapat persamaan waktu, sehingga menjadi:

$$\delta = \frac{\pi f_0}{2H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (2.96)$$

Dengan nilai δ merupakan sudut kritis δ_c , persamaan dalam menentukan prediksi waktu pemutus kritis yaitu:

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}} \quad (2.97)$$

2.8 Standar Kestabilan Transien

2.8.1 Standar Sudut Rotor

Pada generator, peningkatan torsi *input* hingga sudut rotor melebihi 90° , akan menyebabkan *slip pole* dan akan kehilangan sinkronisasi terhadap sistem, dengan asumsi beban elektrik konstan. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor dapat berhenti dengan sudut rotor melewati 90° , atau pada keadaan transien ayunan sudut rotor bisa melewati 180° . Jika gangguan yang terjadi tidak segera diatasi, maka mesin akan terus terjadi *slipping pole* dan dalam waktu dekat akan lepas dari sinkronisasi terhadap sistem yang terhubung.

Jika kondisi ayunan sudut rotor tidak melebihi 180° , atau jika gangguan yang menyebabkan kestabilan ayunan rotor terganggu tidak segera diatasi, generator akan tetap dalam keadaan sinkron dengan sistem. Pada sudut rotor kemudian akan berisolasi dalam mengurangi ayunan hingga nilainya menetap dibawah 90° [15].

2.8.2 Standar Critical Clearing Time (CCT)

Pemutusan waktu kritis atau *critical clearing time* (CCT) adalah waktu kritis dalam membuka CB untuk menghilangkan gangguan diantara kondisi stabil dan tidak stabil dengan mengamati kestabilan sudut

rotor pada generator. Tujuan dari penentuan CCT ini, agar generator mampu mempertahankan keadaan sinkron dalam sistem interkoneksi. Apabila gangguan dihilangkan sebelum waktu kritis maka sistem akan stabil. Akan tetapi, jika gangguan dihilangkan melebihi waktu kritis, maka sistem tidak stabil sehingga generator dapat lepas dari sistem.

Ketika terjadi gangguan hubung singkat, diharapkan pemutus saluran dapat bekerja dengan cepat dan tepat pada suatu sistem kelistrikan. Waktu yang dipakai untuk *clearing time* berdasarkan standar SPLN No 52-1 Tahun 1983 terhadap suatu sistem tegangan, yaitu[16]:

1. 70 kV *clearing time* ≤ 150 mili detik
2. 150 kV *clearing time* ≤ 120 mili detik
3. 275 kV *clearing time* ≤ 100 mili detik
4. 500 kV *clearing time* ≤ 90 mili detik

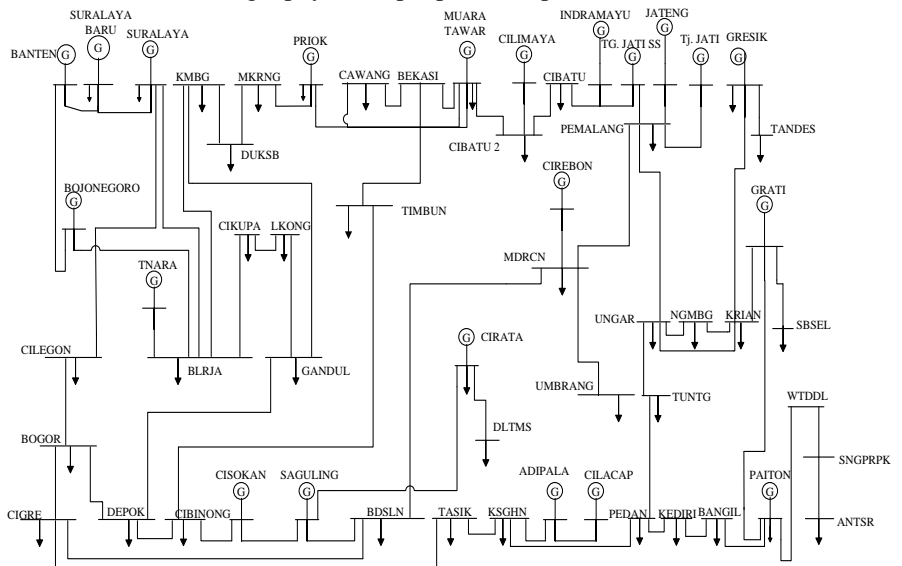
Pengaman cadangan terhadap gangguan yang digunakan untuk *clearing time* adalah 500 mili detik.

BAB III DATA DAN METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas mengenai sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV tahun 2019 berupa data saluran transmisi, kapasitas dan pembangkitan, data pembebanan pada gardu induk, rumusan pembentukan SMIB, dan metodologi simulasi dengan *software* MATLAB.

3.1 Sistem Jaringan Listrik JAMALI 500kV

Dalam melakukan proses analisa kestabilan transien dengan *power flow tracing*, diperlukan *single line diagram* (SLD) pada sistem JAMALI 500kV. Data yang digunakan yaitu data JAMALI 500kV pada tahun 2019. Berikut merupakan topologi dari sistem JAMALI 500kV tahun 2019. Untuk lebih lengkapnya terdapat pada Lampiran A:



Gambar 3.1 Topologi Jaringan Sistem JAMALI 500 kV 2019

3.2 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV 2019

Dalam melakukan simulasi dibutuhkan data saluran antar bus yang terhubung interkoneksi. Berikut, pada tabel 3.1 merupakan data saluran transmisi yang menunjukkan data impedansi, reaktansi, dan *line charging* dalam satuan per unit (p.u) pada masing-masing saluran setiap bus.

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV Tahun 2019

ID	Dari Bus	Ke Bus	R (p.u)	X (p.u)	1/2B (p.u)
Line1	Suralaya Baru	Suralaya	5.05E-06	6.19E-05	0.015
Line2	Cawang	Bekasi	0.000209	0.0018978	0.085
Line3	Tuntang	Pedan	0.000289	0.0027954	0.665
Line4	Cawang	Muara Tawar	0.0005955	0.0054097	0.2413
Line5	Ungaran	Tuntang	0.0001135	0.001	0.2620984
Line6	Cilegon	Suralaya	6.44E-05	0.000623	0.1492222
Line7	Suralaya	Balaraja	0.0003872	0.0031513	0.7405525
Line8	Gresik	Tandes	5.42E-05	0.0005242	0.12575
Line9	Surabaya Sel	Grati	0.0003362	0.0027363	0.6433005
Line10	Ujung Berang	Mandiracan	0.0010722	0.0097408	0.4335
Line11	Paiton	Watudodol	0.0005298	0.0064892	1.5683
Line12	Kediri	Bangil	0.0004423	0.0042779	1.017375
Line13	Ungaran	Ngimbang	0.0024852	0.0225777	1.0030545
Line14	Ngimbang	Krian	0.0006324	0.0057457	0.2561943
Line15	Gresik	Krian	0.0001474	0.0012	0.28281
Line16	Ungaran	Krian	0.0031535	0.028649	1.27245
Line17	Krian	Grati	0.0004098	0.003964	0.9428
Line18	Depok	Gandul	3.65E-05	0.0002974	0.0710274
Line19	Depok	Cibinung	9.61E-05	0.0007817	0.185
Line20	Bangil	Paiton	0.0004821	0.0046633	1.11
Line21	Pemalang	Mandiracan	0.0006753	0.0082725	2

ID	Dari Bus	Ke Bus	R (p.u)	X (p.u)	1/2B (p.u)
Line22	Watudodol	Segararupek	1.84E-05	0.0002055	0.05
Line23	Cirata	Saguling	0.0001552	0.0012635	0.2977242
Line24	Saguling	Bandung Sel	0.0002013	0.0019468	0.463663
Line25	Ujung Berung	Bandung Sel	0.000408	0.0037068	0.165
Line26	Bandung Sel	Mandiracan	0.0004824	0.0059096	1.42835
Line27	Tasik	Kesugihan	0.00056	0.0054161	1.287707
Line28	Kesugihan	Adipala	5.59E-05	0.0006851	0.1667
Line29	Adipala	Cilacap	1.94E-05	0.0002373	0.05855
Line30	Kesugihan	Pedan	0.0010116	0.0097839	2.325172
Line31	Segararupek	Antosari	0.0004141	0.0050725	1.2261705
Line32	Pedan	Kediri	0.0010554	0.0102082	2.426
Line33	Paiton	Grati	0.000456	0.0044109	1.05
Line34	Kembangan	Gandul	0.0001556	0.0015047	0.35865
Line35	Banten	Suralaya Baru	5.37E-06	4.37E-05	0.011511
Line36	Banten	Bojanegara	7.16E-05	0.0005829	0.138025
Line37	Bojanegara	Balaraja	0.0003701	0.0030124	0.7081
Line38	Tanara	Balaraja	8.48E-05	0.0010393	0.2522152
Line39	Priok	Muara Tawar	6.07E-05	0.000743	0.1806817
Line40	Muara Karang	Durikosambi	6.07E-05	0.0007431	0.1806707
Line41	Muara Karang	Priok	4.04E-05	0.0004954	0.12087
Line42	Kembangan	Durikosambi	1.21E-05	0.0001486	0.03715
Line43	Kembangan	Balaraja	0.0002753	0.0036635	0.1687603
Line44	Cikupa	Balaraja	3.74E-05	0.0004582	0.1119
Line45	Cikupa	Lekong	8.09E-05	0.0009907	0.2405
Line46	Lekong	Gandul	9.87E-05	0.0008033	0.19

ID	Dari Bus	Ke Bus	R (p.u)	X (p.u)	1/2B (p.u)
Line47	Cilegon	Bogor	0.0014298	0.0129901	0.57765
Line48	Bogor	Depok	0.0001576	0.0012823	0.30215
Line49	Cigereleng	Tasik	0.0004387	0.0042435	1.01
Line50	Bogor	Cigereleng	0.0005732	0.0046648	1.0958
Line51	Bekasi	Muara Tawar	7.98E-05	0.0006492	0.153575
Line52	Cilamaya	Cibatu Baru	0.0001847	0.0022623	0.5476
Line53	Muara Tawar	Cibatu Baru	0.0001774	0.0017157	0.4087663
Line54	Cibatu Baru	Cibatu	2.58E-05	0.0002496	0.0605301
Line55	Deltamas	Cibatu	1.03E-05	9.98E-05	0.025
Line56	Cirata	Deltamas	0.0002224	0.0021515	0.5122755
Line57	Tj Jati - SS	Pemalang	0.0005338	0.0065388	1.58025
Line58	Jateng	Pemalang	8.09E-05	0.0009907	0.24
Line59	Pemalang	Ungaran	0.0003671	0.0035506	0.84462
Line60	Pemalang	Tanjung Jati	0.0007328	0.0089759	2.1688
Line61	Tanjung Jati	Ungaran	0.0006957	0.0067289	1.59955
Line62	Cirebon	Mandiracan	4.04E-05	0.0004954	0.12
Line63	Indramayu	Tj. Jati - SS	0.0003697	0.0045286	1.095
Line64	Deltamas	Indramayu	0.0003646	0.0044667	1.0798735
Line65	Cigereleng	Bandung Sel	6.60E-05	0.0006379	0.1528
Line66	Bekasi	Tambun	6.51E-05	0.0005302	0.1256547
Line67	Cibinung	Tambun	0.0001352	0.0011	0.2595
Line68	Cibinung	Cisokan	0.0003541	0.0034249	0.815
Line69	Cisokan	Saguling	0.0001007	0.0009744	0.2327
Line70	Bogor	Cibinong	0.0002787	0.0025324	0.1136173

3.3 Data Pembangkitan Generator Jamali pada Tahun 2019

Pada sistem kelistrikan Jamali pada tahun 2019 terdapat beberapa generator dengan data kapasitas dan pembangkitan yang ada pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Pembangkitan Generators JAMALI 500KV Tahun 2019

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	MVA	MW	PF %
1	Suralaya Baru	PLTU Slaya Baru	735	370.00	80
		PLTU Slaya4	500	290.00	85
		PLTU Slaya5	750	430.00	85
		PLTU Slaya6	750	430.00	85
		PLTU Slaya7	750	438.19	85
3	Muara Tawar	PLTGU Mtwar Gb1.1	185	110.00	80
		PLTGU Mtwar Gb1.2	185	110.00	80
		PLTGU Mtwar St1.0	288	180.00	80
		PLTGU Mtwar Gt 5.1	312.5	190.00	80
		PLTGU Mtwar 2.0	271.25	160.00	80
		PLTGU Mtwar 3.0	271.25	160.00	80
		PLTGU Mtwar 4.0	271.25	160.00	80
4	Tanjung Jati	PLTU Tjati 3	802	475.00	90
		PLTU Tjati 4	802	475.00	90
		PLTU Tjati 5	1176.47	660.00	85
		PLTU Tjati 6	1176.47	660.00	85
5	Gresik	PLTGU Gresik 3	250	150.00	80
		PLTGU Jawa 3.1	375	225.00	80
		PLTGU Jawa 3.2	625	375.00	80
6	Cirata	PLTA Cirata1	140	65.00	90
		PLTA Cirata2	140	65.00	90
		PLTA Cirata3	140	65.00	90
		PLTA Cirata4	140	65.00	90
7	Grati	PLTGU Grati Gb1.1	150	95.00	80
		PLTGU Grati Gb1.2	150	95.00	80
		PLTGU Grati Gb1.3	150	95.00	80
		PLTGU Grati Sb1.0	250	155.00	80
		PLTGU Grati Sb2.0	187.5	120.00	80
8	Saguling	PLTA Saguling1	206.1	80.00	85
		PLTA Saguling2	206.1	80.00	85

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	MVA	MW	PF %
9	Adipala	PLTU Adipala	750	400.00	85
10	Cilacap	PLTU Cilacap1	750	415.00	85
		PLTU Cilacap2	1176.47	655.00	85
11	Paiton	PLTU Paiton3	1045	600.00	80
		PLTU Paiton5	800	460.00	80
		PLTU Paiton6	800	460.00	80
		PLTU Paiton7	800	460.00	80
		PLTU Paiton8	800	460.00	80
12	Priok	PLTGU Priok	1000	550.00	80
13	Bojanegara	PLTU Bojanegara1	1176.47	675.00	85
		PLTU Bojanegara2	1176.47	675.00	85
14	Tanara	PLTU Tanara1	1176.47	675.00	85
		PLTU Tanara2	1176.47	675.00	85
15	Cirebon	PLTU Cirebon	1176.47	670.00	85
16	Indramayu	PLTU Indramayu	1176.47	670.00	85
17	Tj. Jati-SS	PLTU Tjatia-SS1	825	400.00	80
		PLTU Tjatia-SS2	825	400.00	80
18	Cisokan	PLTA Cisokan1	306	180.00	85
		PLTA Cisokan2	306	180.00	85
		PLTA Cisokan3	306	180.00	85
19	Cilamaya	PLTGU Cilamaya1	1000	505.00	80
		PLTGU Cilamaya2	1000	505.00	80
20	Jateng	PLTU Jateng1	1176.47	575.00	85
		PLTU Jateng2	1176.47	575.00	85
21	Banten	PLTU Banten	788	400.00	85

3.4 Data Reaktansi, Daya Mekanis, dan Inersia

Dalam melakukan analisis *Equal Area Criterion* dalam sistem SMIB, diperlukan data-data reaktansi generator (X_d'), reaktansi trafo (X_t), daya mekanis generator (P_m), dan inersia (H).

Tabel 3.3 Data Reaktansi, Daya Mekanis, dan Inersia

Nama Pembangkit	X_d' (p.u)	X_t (p.u)	Momen Inersia	P_m (p.u)
PLTU Slaya Baru	0.0425903	0.016	4	3.7
PLTU Slaya4	0.0435259	0.0255319	1.46625	3.5
PLTU Slaya5	0.0444767	0.016	1.7	4.3
PLTU Slaya6	0.0444767	0.016	1.7	4.3
PLTU Slaya7	0.043645	0.016	1.72	4.38
PLTGU Mtwar Gb1.1	0.0403636	0.0450331	4	1.1
PLTGU Mtwar Gb1.2	0.0403636	0.0450331	4	1.1
PLTGU Mtwar St1.0	0.043776	0.0566667	4	1.8
PLTGU Mtwar Gt 5.1	0.0325	0.0255319	4	1.9
PLTGU Mtwar 2.0	0.049248	0.0483333	4.46	1.6
PLTGU Mtwar 3.0	0.049248	0.0483333	4.46	1.6
PLTGU Mtwar 4.0	0.049248	0.0483333	4.46	1.6
PLTU Tjati 3	0.0496902	0.0209924	4.5	4.75
PLTU Tjati 4	0.0496902	0.0209924	4.5	4.75
PLTU Tjati 5	0.0360606	0.0120833	1.83	6.6
PLTU Tjati 6	0.0360606	0.0120833	1.83	6.6
PLTGU Gresik 3	0.038	0.054	4	1.5
PLTGU Jawa 3.1	0.0995556	0.0308511	4	2.25
PLTGU Jawa 3.2	0.0597333	0.0193333	2.95	3.75
PLTA Cirata1	0.0531138	0.0643087	1.845	0.65
PLTA Cirata2	0.0531138	0.0643087	1.845	0.65
PLTA Cirata3	0.0531138	0.0643087	1.845	0.65
PLTA Cirata4	0.0531138	0.0643087	1.845	0.65
PLTGU Grati Gb1.1	0.0378947	0.0771242	4	0.95
PLTGU Grati Gb1.2	0.0378947	0.038374	4	0.95
PLTGU Grati Gb1.3	0.0378947	0.038374	4	0.95
PLTGU Grati Sb1.0	0.0367742	0.0552	4	1.55

Nama Pembangkit	Xd' (p.u)	Xt (p.u)	Momen Inersia	Pm (p.u)
PLTGU Grati Sb2.0	0.1866667	0.0604167	3.95	1.2
PLTA Saguling1	0.0501467	0.0436575	4.25	0.8
PLTA Saguling2	0.0501467	0.0436575	4.25	0.8
PLTU Adipala	0.0478125	0.016	1.7	4
PLTU Cilacap1	0.0460843	0.016	1.7	4.15
PLTU Cilacap2	0.0363359	0.0120833	1.83	6.55
PLTU Paiton3	0.037202	0.0166667	4	6
PLTU Paiton5	0.0416835	0.0184615	4	4.6
PLTU Paiton6	0.0416835	0.0184615	4	4.6
PLTU Paiton7	0.0416835	0.0184615	4	4.6
PLTU Paiton8	0.0416835	0.0184615	4	4.6
PLTGU Priok	0.0407273	0.0142157	2.25	5.5
PLTU Bojanegara1	0.0352593	0.0116	1.83	6.75
PLTU Bojanegara2	0.0352593	0.0116	1.83	6.75
PLTU Tanara1	0.0352593	0.0116	1.83	6.75
PLTU Tanara2	0.0352593	0.0116	1.83	6.75
PLTU Cirebon	0.0355224	0.0116	1.83	6.7
PLTU Indramayu	0.0355224	0.0116	1.83	6.7
PLTU Tjatia-SS1	0.056	0.0201389	2.6	4
PLTU Tjatia-SS2	0.056	0.0201389	2.6	4
PLTA Cisokan1	0.1322222	0.0483333	3.95	1.8
PLTA Cisokan2	0.1322222	0.0483333	3.95	1.8
PLTA Cisokan3	0.1322222	0.0483333	3.95	1.8
PLTGU Cilamaya1	0.0443564	0.0142157	2.25	5.05
PLTGU Cilamaya2	0.0443564	0.0142157	2.25	5.05
PLTU Jateng1	0.0413913	0.0116	1.926	5.75
PLTU Jateng2	0.0413913	0.0116	1.926	5.75
PLTU Banten	0.050235	0.016	4.25	4

3.5 Data Beban JAMALI Tahun 2019

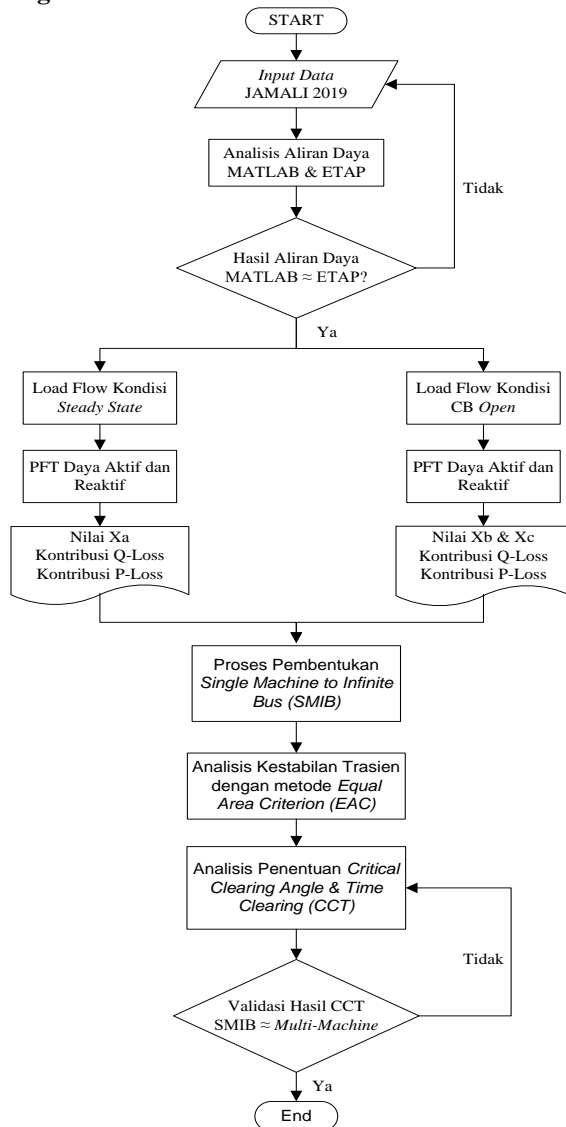
Data beban JAMALI pada tahun 2019 yang terdapat pada Tabel 3.4 merupakan data pembebanan pada kondisi puncak.

Tabel 3.4 Data Beban Puncak JAMALI Tahun 2019

No.	Bus GITET	BEBAN	
		MW	MVAR
1	ANTOSARI	694.300	336.2646
2	BANDUNG SELATAN	165.500	80.1554
3	BEKASI	348.400	168.7378
4	BALARAJA	901.900	436.8101
5	BANGIL	418.900	202.8824
6	BOGORX	212.700	103.0152
7	CIBATU	803.500	389.1529
8	CIBATU BARU	328.500	159.0998
9	CIBINONG	475.200	230.1499
10	CIGERELENG	353.100	171.0140
11	CIKUPA	591.200	286.3313
12	CILEGON	392.400	190.0480
13	CIRATA	182.200	88.2433
14	CAWANG	691.300	334.8118
15	DEPOK	440.900	213.5377
16	DELTAMAS	412.800	199.9283
17	DURI KOSAMBI	542.000	262.5025
18	GANDUL	1094.600	530.1389
19	GRATI	443.500	214.7970
20	GRESIK	44.800	21.6977
21	KEDIRI	710.200	343.9655
22	KEMBANGAN	422.600	204.6747

No.	Bus GITET	BEBAN	
		MW	MVAR
23	KRIAN	864.200	418.5511
24	KESUGIHAN	734.000	355.4922
25	LEKONG	620.400	300.4733
26	MANDIRACAN	360.400	174.5495
27	MUARAKARANG	217.300	105.2430
28	MUARA TAWAR	285.400	138.2255
29	NGIMBANG	487.900	236.3007
30	PEDAN	548.200	265.5053
31	PAITON	515.500	249.6682
32	PEMALANG	307.900	149.1227
33	PRIOK	624.400	302.4109
34	SURABAYA SELATAN	495.400	239.9330
35	SURALAYA	27.900	13.5126
36	SURALAYA BARU	65.900	31.9167
37	TASIK	358.800	173.7749
38	TANJUNG JATI	507.500	245.7935
39	TAMBUN	440.300	213.2469
40	TANDES	263.500	127.6190
41	TUNTANG	435.100	210.7284
42	UJUNG BERUNG	352.700	170.8205
43	UNGARAN	118.900	57.5859
TOTAL		19302.097	9348.433

3.6 Metodologi



Gambar 3.2 Flow Chart Metodologi Analisis

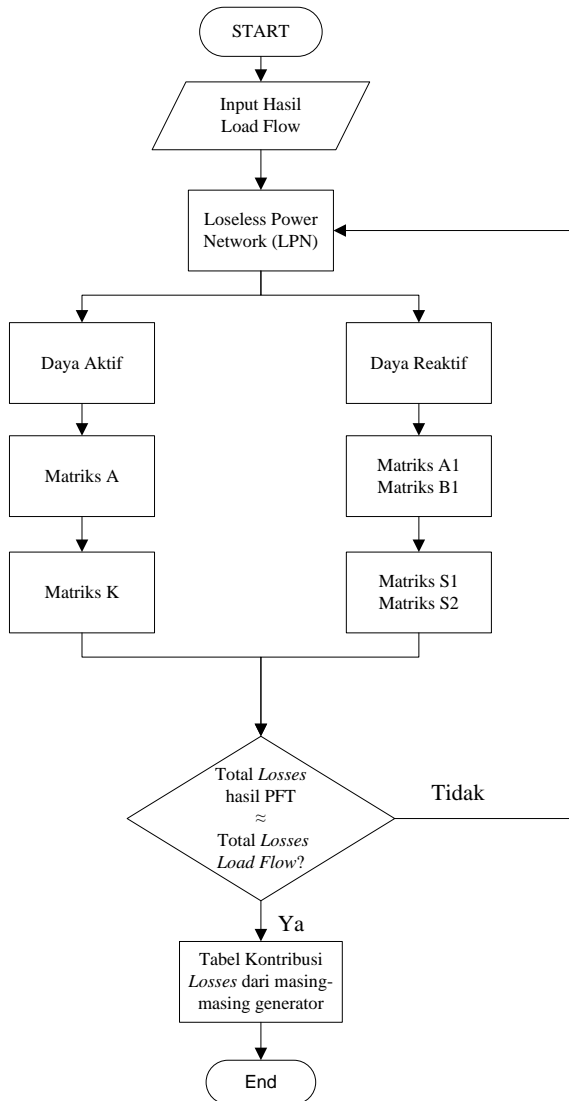
Metodologi ini merupakan gambaran atau tahapan-tahapan dalam menjalankan analisis pada tugas akhir ini. Metodologi ini digunakan untuk memperoleh hasil dan analisis kestabilan transien sesuai dengan tahapan-tahapan yang benar. Pada Gambar 3.2 merupakan *flow chart* metodologi yang dilakukan dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan uraian berikut ini:

1. Aliran Daya

Untuk mengetahui aliran daya pada sistem dilakukan analisa aliran daya dengan menggunakan *software* MATLAB. Analisa aliran disimulasikan dengan menggunakan data-data beban, data saluran, dan data pembangkitan dari data sistem transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019. Pada tahap ini merupakan tahap awal yang harus dibandingkan dengan ETAP untuk memastikan bahwa data yang diolah pada MATLAB telah sesuai dengan data sebenarnya yang ada pada ETAP.

2. *Power Flow Tracing*

Pada tahapan ini merupakan tahapan untuk mereduksi sistem *multi-machine* menjadi sistem SMIB. Melalui *power flow tracing*, kontribusi suatu generator ke suatu beban dan *losses* di suatu saluran dapat diketahui. Dengan berbasis konsep menggunakan *extended incidence matrix* dan sistem *lossless power network* yang menggambarkan hubungan antar bus pada suatu sistem. Pada Gambar 3.3 merupakan gambaran alur proses kerja dari sistem *power flow tracing* menggunakan MATLAB.



Gambar 3.3 *Flow Chart Program Metode Power Flow Tracing*

3. Pemodelan *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB)

Pada tugas akhir ini, karena merupakan sistem *multi-machine* dengan berbasis pada *single machine to infinite bus*, maka perlu dilakukan pemodelan sistem menjadi SMIB. Hal ini dilakukan untuk mempermudah cara melakukan analisis kestabilan transien yang merepresentasikan sistem *multi-machine*.

4. Analisa Kestabilan Transien dengan *Equal Area Criterion*

Pada tahapan ini analisis kestabilan transien menggunakan konsep *equal area criterion* akibat gangguan hubung singkat. Pada *equal area criterion* memperhatikan 3 kondisi, yaitu kondisi sebelum gangguan atau kondisi *steady state*, kondisi saat gangguan hubung singkat, dan gangguan setelah terjadinya hubung singkat. Dari kondisi-kondisi tersebut akan dianalisis apakah sistem stabil atau tidak. Jika kondisi termasuk dalam stabil kritis, maka akan diketahui nilai sudut kritis. Dari sudut kritis inilah bisa diketahui besaran prediksi nilai waktu pemutus kritis atau *critical clearing time*.

5. Validasi Hasil

Hasil analisa yang telah diperoleh akan divalidasikan dengan sistem *multi-machine* pada *software* MATLAB. Pada tahapan ini bertujuan untuk membuktikan bahwa hasil yang diperoleh telah sesuai dengan sistem *multi-machine*. Selain itu, pada tahapan ini juga dapat membuktikan apakah dengan metode yang digunakan sesuai dengan kondisi sistem *multi-machine*

6. Penarikan Kesimpulan

Berdasarkan hasil validasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan apakah pendekatan sistem *multi-machine* berbasis SMIB dengan menggunakan metode *power flow tracing* mendapatkan hasil yang sesuai dengan sistem *multi-machine* pada *software* MATLAB.

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini terdapat beberapa bagian. Pada bagian pertama akan dipaparkan hasil atau *output* perbandingan simulasi ETAP dan MATLAB sebagai proses awal dalam melakukan analisis. Pada bagian ini, memastikan bahwa data *input* dan *output* MATLAB sudah sesuai dan benar dengan sistem JAMALI pada ETAP. Jika tahap ini sudah sesuai, maka bagian selanjutnya yaitu proses analisis dan pemaparan hasil dari *power flow tracing* dengan menggunakan *extended incidence matrix* pada daya aktif dan reaktif. Pada bagian selanjutnya merupakan data-data hasil saluran reaktansi X_a , X_b , dan X_c dari sistem SMIB yang akan digunakan dalam melakukan analisis kestabilan transien dengan menggunakan metode EAC. Pada bagian akhir dari bab ini yaitu mengenai hasil validasi dari hasil yang telah di analisis terhadap sistem *multi-machine* pada MATLAB.

4.1 Hasil Perbandingan ETAP dengan MATLAB

Pada tahap ini, merupakan tahapan awal yang harus dilakukan dalam melakukan analisis kestabilan transien. Karena pada proses ini dilakukan perbandingan rekap hasil *load flow* dari sistem JAMALI pada *software* ETAP dengan sistem JAMALI pada *software* MATLAB. Hal ini dilakukan untuk memastikan, bahwa data yang di masukkan pada MATLAB sudah sesuai dengan data-data yang telah di masukkan pada ETAP. Simulasi yang dilakukan pada ETAP maupun MATLAB ini berdasarkan pada nilai MVA *Base* 100 MVA. Rekap hasil terdapat pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1 Rekap Hasil Perbandingan ETAP dengan Matlab

<i>Software</i>	Beban		Generator		<i>Losses</i>	
	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
Etap	19302	9348.43	19428	3371.34	126.665	-5977.091
Matlab	19302.1	9348.433	19428.84	3371.34	126.74	-5977.092
%Error	0.00052	3.21E-05	0.00434	5.93E-05	0.0615	1.673E-05

Pada hasil Tabel 4.1 dapat dikatakan hasil *running load flow* antara *software* ETAP dengan MATLAB mendekati sama. Dapat diamati pada persentase *error* antara ETAP dengan MATLAB pun tidak tinggi, bahkan cenderung mendekati 0%. Berdasarkan hasil ini, maka data yang

digunakan dan proses yang ada pada MATLAB telah sesuai dengan pengolahan data yang digunakan pada ETAP. Artinya, hasil dari MATLAB telah sesuai dengan hasil dari ETAP.

4.2 Perbandingan *Losses* ETAP & MATLAB

Perbandingan *losses* ini perlu dilakukan lebih rinci, dikarenakan konsep dari *power flow tracing* menggunakan nilai *losses* dari masing-masing salurannya untuk melacak aliran daya dengan menggunakan konsep *extended incidence matrix* yang menggambarkan hubungan antar bus pada suatu saluran. Jika nilai ETAP dan MATLAB tidak berbanding jauh, maka nilai dari hasil *power flow tracing* pun dapat dikatakan merepresentasikan sistem *multi-machine*. Pada Tabel 4.2 merupakan hasil perbandingan *losses* ETAP dengan MATLAB sebelum dilakukannya proses *Power Flow Tracing*.

Tabel 4.2 Data Perbandingan *Losses* ETAP& MATLAB

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
PLTU Slaya Baru	Suralaya Baru	0.486	24.284	0.486	24.275	0.07	0.038
PLTU Slaya4	Suralaya	0.457	22.87	0.457	22.864	0.09	0.025
PLTU Slaya5	Suralaya	0.638	31.878	0.637	31.869	0.09	0.03
PLTU Slaya6	Suralaya	0.638	31.878	0.637	31.869	0.09	0.03
PLTU Slaya7	Suralaya	0.662	33.079	0.662	33.081	0.06	0.005
PLTG U Mtwar Gb1.1	Muara Tawar	0.144	7.2198	0.144	7.215	0.27	0.066
PLTG U Mtwar Gb1.2	Muara Tawar	0.144	7.2198	0.144	7.215	0.27	0.066
PLTG U Mtwar St1.0	Muara Tawar	0.119	20.252	0.119	20.248	0.11	0.021

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
PLTG U Mtwar Gt 5.1	Muara Tawar	0.124	14.923	0.124	14.912	0.29	0.075
PLTG U Mtwar 2.0	Muara Tawar	0.283	14.17	0.283	14.166	0.14	0.03
PLTG U Mtwar 3.0	Muara Tawar	0.283	14.17	0.283	14.166	0.14	0.03
PLTG U Mtwar 4.0	Muara Tawar	0.283	14.17	0.283	14.166	0.14	0.03
PLTU Tjati 3	T. Jati	0.361	43.29	0.361	43.303	0.07	0.029
PLTU Tjati 4	T. Jati	0.361	43.29	0.361	43.113	0.07	0.41
PLTU Tjati 5	T. Jati	0.961	48.027	0.961	48.037	0.05	0.021
PLTU Tjati 6	T. Jati	0.961	48.027	0.961	48.037	0.05	0.021
PLTG U Gresik 3	Gresik	0.082	12.316	0.082	12.348	0.13	0.26
PLTG U Jawa 3.1	Gresik	0.316	15.805	0.318	15.91	0.6	0.666
PLTG U Jawa 3.2	Gresik	0.55	27.497	0.553	27.669	0.56	0.625
PLTA Cirata1	Cirata	0.016	2.9668	0.016	2.966	2.92	0.026
PLTA Cirata2	Cirata	0.016	2.9668	0.016	2.966	2.92	0.026
PLTA Cirata3	Cirata	0.016	2.9668	0.016	2.966	2.92	0.026

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
PLTA Cirata4	Cirata	0.016	2.9668	0.016	2.966	2.92	0.026
PLTG U Grati Gb1.1	Grati	0.054	6.9969	0.054	7.019	0.48	0.316
PLTG U Grati Gb1.2	Grati	0.069	3.468	0.07	3.518	0.92	1.443
PLTG U Grati Gb1.3	Grati	0.069	3.468	0.07	3.518	0.92	1.443
PLTG U Grati Sb1.0	Grati	0.089	13.31	0.089	13.323	0.3	0.099
PLTG U Grati Sb2.0	Grati	0.174	8.7102	0.175	8.755	0.46	0.515
PLTA Saguling g1	Saguling	0.06	3.0022	0.06	3.002	0.07	0.007
PLTA Saguling g2	Saguling	0.06	3.0022	0.06	3.002	0.07	0.007
PLTU Adipala	Adipala	0.495	24.753	0.495	24.758	0.01	0.02
PLTU Cilacap 1	Cilacap	0.533	26.644	0.533	26.648	0.02	0.015
PLTU Cilacap 2	Cilacap	1.003	50.135	1.003	50.144	0.03	0.018
PLTU Paiton3	Paiton	0.58	69.556	0.543	65.193	6.32	6.273
PLTU Paiton5	Paiton	0.319	38.294	0.321	38.476	0.59	0.476
PLTU Paiton6	Paiton	0.319	38.294	0.321	38.476	0.59	0.476
PLTU Paiton7	Paiton	0.319	38.294	0.321	38.476	0.59	0.476
PLTU Paiton8	Paiton	0.319	38.294	0.321	38.476	0.59	0.476

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
PLTG U Priok	Paiton	1.007	50.337	1.006	50.318	0.07	0.038
PLTU Bojane gara1	Bojonegar a	1.117	55.847	1.117	55.834	0	0.024
PLTU Bojane gara2	Bojonegar a	1.117	55.847	1.117	55.834	0	0.024
PLTU Tanara 1	Tanara	1.213	60.649	1.213	60.628	0	0.035
PLTU Tanara 2	Tanara	1.213	60.649	1.213	60.628	0	0.035
PLTU Cirebo n	Cirebon	1.004	50.211	1.004	50.217	0.02	0.012
PLTU Indram ayu	Indramayu	1.015	50.728	1.015	50.73	0.04	0.005
PLTU Tjatia- SS1	T. Jati-SS	0.604	30.205	0.604	30.155	0.02	0.165
PLTU Tjatia- SS2	T. Jati-SS	0.604	30.205	0.604	30.207	0.02	0.008
PLTA Cisoka n1	Cisokan	0.322	16.091	0.322	16.09	0.06	0.003
PLTA Cisoka n2	Cisokan	0.322	16.091	0.322	16.09	0.06	0.003
PLTA Cisoka n3	Cisokan	0.322	16.091	0.322	16.09	0.06	0.003
PLTG U Cilama ya1	Cilamaya	0.755	37.738	0.755	37.734	0.03	0.011
PLTG U Cilama ya2	Cilamaya	0.755	37.738	0.755	37.734	0.03	0.011

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
PLTU Jateng1	Jateng	0.703	35.132	0.703	35.141	0.05	0.027
PLTU Jateng2	Jateng	0.703	35.132	0.703	35.141	0.05	0.027
PLTU Banten	Banten	0.518	25.922	0.518	25.919	0.08	0.01
Kesugi han	Adipala	1.167	-19.89	1.167	-20.12	0.01	1.177
Adipal a	Cilacap	0.214	-9.22	0.214	-9.471	0.18	2.727
Segarar upek	Antosari	2.202	-219.9	2.231	-216.8	1.33	1.402
Banten	Suralaya Baru	0.007	-1.969	0.007	-2.216	0.67	12.54
Banten	Bojanegara	0.001	-26.99	0.001	-27.24	31.1	0.923
Sagulin g	Bandung Sel	0.232	-89.03	0.229	-89.31	1.5	0.307
Ujung Berung	Bandung Sel	0.007	-32.66	0.007	-32.76	1.15	0.313
Bandu ng Sel	Mandiraca n	1.942	-265.6	1.931	-266	0.55	0.128
Cigerel eng	Bandung Sel	0.161	-28.51	0.16	-28.77	0.66	0.919
Bojane gara	Balaraja	7.813	-73.69	7.812	-73.95	0.02	0.355
Cawan g	Bekasi	0.494	-11.25	0.494	-11.4	0.07	1.326
Bekasi	Muara Tawar	0.897	-21.39	0.897	-21.63	0.05	1.14
Bekasi	Tambun	0.027	-23.14	0.027	-23.37	0.44	1.024
Suralay a	Balaraja	7.366	-83.63	7.365	-83.89	0.01	0.311
tanara	Balaraja	1.795	-26.26	1.794	-26.52	0.03	0.954
Kemba ngan	Balaraja	2.575	2.6056	2.575	2.367	0	9.157
Cikupa	Balaraja	2.08	4.4218	2.08	4.178	0.01	5.514
Kediri	Bangil	0.222	-207.7	0.24	-206	7.88	0.804

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
Bangil	Paiton	1.885	-209.3	1.912	-207.3	1.41	1.001
Cilegon	Bogor	3.844	-76.55	3.843	-76.8	0.01	0.334
Bogor	Depok	0.54	-52.47	0.539	-52.72	0.12	0.479
Bogor	Cigereleng	1.417	-201	1.411	-201.3	0.42	0.145
Bogor	Cibinong	0.143	-19.98	0.143	-20.22	0.04	1.195
Cibatu Baru	Cibatu	0.036	-11.07	0.036	-11.31	0.27	2.199
Deltamas	Cibatu	0.155	-3.076	0.155	-3.328	0.1	8.176
Cilamaya	Cibatu Baru	1.993	-81.31	1.993	-81.57	0	0.315
Muara Tawar	Cibatu Baru	1.652	-61.72	1.649	-61.99	0.2	0.444
Depok	Cibinong	0.068	-33.97	0.068	-34.27	0.14	0.886
Cibinong	Tambun	0.131	-47.51	0.131	-47.77	0.25	0.556
Cibinong	Cisokan	2.039	-136.3	2.037	-136.7	0.11	0.236
Cigereleng	Tasik	0.319	-198.6	0.318	-198.9	0.34	0.19
Cikupa	Lekong	2.357	-16.27	2.357	-16.52	0	1.5
Cilegon	Suralaya	0.557	-23.76	0.557	-24.01	0.05	1.051
Cirata	Saguling	0.056	-57.56	0.056	-57.81	0.39	0.432
Cirata	Deltamas	0.148	-97.77	0.148	-98.02	0.32	0.255
Cirebon	Mandiracana	0.175	-22.62	0.175	-22.69	0.06	0.321
Cisokan	Saguling	0.084	-44.46	0.083	-44.72	1.01	0.566
Cawang	Muara Tawar	0.528	-40.2	0.527	-40.44	0.12	0.603
Depok	Gandul	0.091	-12.34	0.091	-12.58	0.53	1.932
Deltamas	Indramayu	7.519	-122.5	7.502	-122.9	0.22	0.363
Muara Karang	Durikosambi	0.021	-33.32	0.021	-33.55	1.51	0.714

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
Kemba ngan	Durikosam bi	0.027	-6.382	0.027	-6.619	1.45	3.706
Kemba ngan	Gandul	0.008	-66.79	0.008	-67.04	3.38	0.361
Lekong	Gandul	1.063	-26.69	1.063	-26.98	0.02	1.071
Suraba ya Sel	Grati	0.946	-119.5	0.952	-118.9	0.69	0.52
Krian	Grati	0.231	-184.6	0.218	-184	5.53	0.335
Paiton	Grati	1.912	-193.4	1.821	-192.9	4.77	0.264
Gresik	Tandes	0.046	-24.11	0.046	-24.26	1.09	0.633
Gresik	Krian	0.3	-53.15	0.297	-53.19	1.01	0.086
Indram ayu	Tj Jati - SS	2.122	-202.6	2.111	-203	0.53	0.194
Jateng	Pemalang	0.979	-40.15	0.979	-40.27	0.02	0.305
Pedan	Kediri	2.68	-484	2.773	-480.8	3.48	0.656
Ngimb ang	Krian	0.053	-49.91	0.056	-49.93	6.15	0.033
Ungara n	Krian	3.212	-233.5	3.233	-232.8	0.64	0.3
Tasik	Kesugihan	1.705	-246.3	1.718	-246.3	0.75	0.003
Kesugi han	Pedan	0.743	-480.8	0.694	-480.7	6.64	0.014
Ujung Berung	Mandiraca n	1.543	-73.76	1.537	-74.07	0.4	0.407
Pemala ng	Mandiraca n	2.808	-389.9	2.782	-390.5	0.94	0.154
Muara Karang	Priok	0.066	-21.64	0.066	-21.88	0.34	1.101
Priok	Muara Tawar	0.168	-31.75	0.168	-31.99	0.11	0.764
Ungara n	Ngimbang	4.474	-166.5	4.497	-166	0.51	0.309
Tuntan g	Pedan	2.004	-122.7	2.036	-122.3	1.6	0.323
Paiton	Watudodol	2.528	-290	2.555	-286.3	1.09	1.292

BUS		ETAP		MATLAB		%ERROR	
<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
Tj Jati - SS	Pemalang	0.267	-337.1	0.262	-337.2	1.99	0.047
Pemalang	Ungaran	2.874	-155	2.9	-154.8	0.9	0.134
Pemalang	Tj. Jati	1.999	-449	1.996	-449	0.13	0.006
Watudodol	Segararupok	0.09	-9.014	0.091	-9.092	1.66	0.868
Suralaya Baru	Suralaya	0.023	-2.671	0.023	-2.68	0.37	0.341
Tj. Jati	Ungaran	9.36	-257	9.379	-256.7	0.2	0.125
Ungaran	Tuntang	1.8	-38.72	1.823	-40.24	1.29	3.938
TOTAL		126.7	-5977.1	126.7	-5977.1	0.006	8E-05

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.2, diperoleh nilai *losses* yang hampir mendekati antara hasil dari ETAP dengan MATLAB. Perbedaan hasil antara MATLAB dengan ETAP bisa disebabkan karena faktor pembulatan pada *software* yang berbeda. Jika diperhatikan nilai total dari masing-masing, menunjukkan hasil yang hampir sama dengan persentase *error* $\pm 0,006\%$ untuk daya aktif (MW) dan $\pm 8E-05\%$ untuk daya reaktif (MVAR). Berdasarkan hasil data tabel 4.2 dengan persentase *error* yang cukup kecil, maka besaran nilai *losses* pada saat *load flow* bisa digunakan dalam proses *power flow tracing* dengan menggunakan *extended incidence matrix*.

4.3 Hasil Power Flow Tracing Daya Aktif

Pada konsep dasar *power flow tracing* daya aktif yang terdapat pada sub-bab 2.5.2 terdapat dua hasil yaitu kontribusi generator terhadap pembangkitan dan kontribusi *losses* oleh masing-masing generator. Pada sub-bab 4.3.1 dan 4.3.2 merupakan rekap hasil dari hasil PFT daya aktif.

4.3.1 Kontribusi Pembangkitan Generator

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Kontribusi Pembangkitan Generator

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	PEMBANGKITAN		Error %
			Hasil Load Flow	Hasil PFT	
1	Suralaya Baru	PLTU Slaya Baru	370	367.274	0.74
		PLTU Slaya4	290	287.622	0.83
		PLTU Slaya5	430	426.514	0.82
		PLTU Slaya6	430	426.514	0.82
		PLTU Slaya7	438.19	435.274	0.67
3	Muara Tawar	PLTGU Mtwar Gb1.1	110	109.732	0.24
		PLTGU Mtwar Gb1.2	110	109.732	0.24
		PLTGU Mtwar St1.0	180	179.679	0.18
		PLTGU Mtwar Gt 5.1	190	189.663	0.18
		PLTGU Mtwar 2.0	160	159.537	0.29
		PLTGU Mtwar 3.0	160	159.537	0.29
		PLTGU Mtwar 4.0	160	159.537	0.29
4	Tanjung Jati	PLTU Tjati 3	475	469.748	1.12
		PLTU Tjati 4	475	469.748	1.12
		PLTU Tjati 5	660	652.248	1.19
		PLTU Tjati 6	660	652.248	1.19
5	Gresik	PLTGU Gresik 3	150	149.844	0.1
		PLTGU Jawa 3.1	225	224.571	0.19
		PLTGU Jawa 3.2	375	374.262	0.2

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	PEMBANGKITAN		Error %
			Hasil Load Flow	Hasil PFT	
6	Cirata	PLTA Cirata1	65	64.9173	0.13
		PLTA Cirata2	65	64.9173	0.13
		PLTA Cirata3	65	64.9173	0.13
		PLTA Cirata4	65	64.9173	0.13
7	Grati	PLTGU Grati Gb1.1	95	94.8491	0.16
		PLTGU Grati Gb1.2	95	94.8327	0.18
		PLTGU Grati Gb1.3	95	94.8327	0.18
		PLTGU Grati Sb1.0	155	154.753	0.16
		PLTGU Grati Sb2.0	120	119.703	0.25
8	Saguling	PLTA Saguling1	80	79.5608	0.55
		PLTA Saguling2	80	79.5608	0.55
9	Adipala	PLTU Adipala	400	398.179	0.46
10	Cilacap	PLTU Cilacap1	415	413.008	0.48
		PLTU Cilacap2	655	651.695	0.51
11	Paiton	PLTU Paiton3	600	597.131	0.48
		PLTU Paiton5	460	457.896	0.46
		PLTU Paiton6	460	457.896	0.46
		PLTU Paiton7	460	457.896	0.46
		PLTU Paiton8	460	457.896	0.46

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	PEMBANGKITAN		Error %
			Hasil Load Flow	Hasil PFT	
12	Priok	PLTGU Priok	550	548.943	0.19
13	Bojanegara	PLTU Bojanegara1	675	668.752	0.93
		PLTU Bojanegara2	675	668.752	0.93
14	Tanara	PLTU Tanara1	675	671.54	0.52
		PLTU Tanara2	675	671.54	0.52
15	Cirebon	PLTU Cirebon	670	666.347	0.55
16	Indramayu	PLTU Indramayu	670	664.92	0.76
17	Tj. Jati-SS	PLTU Tjatia-SS1	400	395.682	1.09
		PLTU Tjatia-SS2	400	395.682	1.09
18	Cisokan	PLTA Cisokan1	180	179.044	0.53
		PLTA Cisokan2	180	179.044	0.53
		PLTA Cisokan3	180	179.044	0.53
19	Cilamaya	PLTGU Cilamaya1	505	502.137	0.57
		PLTGU Cilamaya2	505	502.137	0.57
20	Jateng	PLTU Jateng1	575	569.455	0.97
		PLTU Jateng2	575	569.455	0.97
21	Banten	PLTU Banten	400	396.984	0.76
TOTAL			19428.19	19302.1	0.65

Pada Tabel 4.3, merupakan hasil dari konfigurasi sistem *power flow tracing* terhadap hasil *load flow*. Berdasarkan pada persamaan (2.5.4) dengan menggunakan metode *power flow tracing using extended incidence matrix*, diperoleh hasil pembangkitan masing-masing generator yang nilainya mendekati dengan hasil *load flow*. Hal ini bisa dibuktikan dengan total nilai yang hampir mendekati dengan persentase *error* $\pm 0,65\%$. Pada Tabel 4.3, merupakan hasil ringkasan dari *power flow tracing* daya aktif.

4.3.2 Kontribusi Losses PFT Daya Aktif

Berdasarkan pada persamaan (2.5.6) yang terdapat pada sub-bab 2.5.2, pada Tabel 4.4 merupakan hasil kontribusi *losses* oleh masing-masing generator terhadap sistem *multi-machine*. Pada Tabel 4.4 merupakan rekap hasil dari hubungan antara generator terhadap saluran yang menghasilkan matriks 112×125 yang menunjukkan besaran nilai kontribusi *losses* oleh setiap generator terhadap masing-masing saluran.

Tabel 4.4 Kontribusi *Losses* PFT Daya Aktif

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	KONTRIBUSI LOSSES (MW)
1	Suralaya Baru	PLTU Slaya Baru	2.726434278
		PLTU Slaya4	2.378467359
		PLTU Slaya5	3.486312715
		PLTU Slaya6	3.486312715
		PLTU Slaya7	3.569068643
3	Muara Tawar	PLTGU Mtwar Gb1.1	0.267571671
		PLTGU Mtwar Gb1.2	0.267571671
		PLTGU Mtwar St1.0	0.320955485
		PLTGU Mtwar Gt 5.1	0.337332345
		PLTGU Mtwar 2.0	0.462534417
		PLTGU Mtwar 3.0	0.462534417
		PLTGU Mtwar 4.0	0.462534417
4	Tanjung Jati	PLTU Tjati 3	5.251667552
		PLTU Tjati 4	5.251661127

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	KONTRIBUSI LOSSES (MW)
		PLTU Tjati 5	7.751636968
		PLTU Tjati 6	7.751636968
5	Gresik	PLTGU Gresik 3	0.156048441
		PLTGU Jawa 3.1	0.428699597
		PLTGU Jawa 3.2	0.73751852
6	Cirata	PLTA Cirata1	0.082736447
		PLTA Cirata2	0.082736447
		PLTA Cirata3	0.082736447
		PLTA Cirata4	0.082736447
7	Grati	PLTGU Grati Gb1.1	0.150879337
		PLTGU Grati Gb1.2	0.167309144
		PLTGU Grati Gb1.3	0.167309144
		PLTGU Grati Sb1.0	0.247349191
		PLTGU Grati Sb2.0	0.297476329
8	Saguling	PLTA Saguling1	0.439187091
		PLTA Saguling2	0.439187091
9	Adipala	PLTU Adipala	1.821417818
10	Cilacap	PLTU Cilacap1	1.991809315
		PLTU Cilacap2	3.304821708
11	Paiton	PLTU Paiton3	2.869413208
		PLTU Paiton5	2.104371943
		PLTU Paiton6	2.104371943
		PLTU Paiton7	2.104371943
		PLTU Paiton8	2.104371943
12	Priok	PLTGU Priok	1.057091379
13	Bojanegara	PLTU Bojanegara1	6.247901836
		PLTU Bojanegara2	6.247901836

No.	Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	KONTRIBUSI LOSSES (MW)
14	Tanara	PLTU Tanara1	3.460185112
		PLTU Tanara2	3.460185112
15	Cirebon	PLTU Cirebon	3.653178327
16	Indramayu	PLTU Indramayu	5.079740017
17	Tj. Jati-SS	PLTU Tjatia-SS1	4.317878237
		PLTU Tjatia-SS2	4.317880779
18	Cisokan	PLTA Cisokan1	0.95641217
		PLTA Cisokan2	0.95641217
		PLTA Cisokan3	0.95641217
19	Cilamaya	PLTGU Cilamaya1	2.862998603
		PLTGU Cilamaya2	2.862998603
20	Jateng	PLTU Jateng1	5.544586558
		PLTU Jateng2	5.544586558
21	Banten	PLTU Banten	3.015577039
TOTAL			126.7430187

Hasil dari Tabel 4.4 ini dapat divalidasi dengan total nilai *losses* hasil dari *running load flow* yang telah terdapat pada sub-bab 4.2. Jika dibandingkan total *losses* pada hasil *load flow* (Tabel 4.2) dengan total *losses* hasil dari *power flow tracing* daya aktif (Tabel 4.4) dapat diamati pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil PFT dan *Load Flow* Daya Aktif

	Hasil <i>Load Flow</i>	Hasil <i>Power Flow</i> <i>Tracing</i>	%Error
Daya Aktif (MW)	126.7	126.7430187	0.033941672

Berdasarkan hasil Tabel 4.5, hasil dari *power flow tracing* ini mendekati dengan hasil dari *running load flow* dengan nilai *error* **0,33941672%**. Dengan demikian, hasil *power flow tracing* daya aktif ini

dapat dikatakan merepresentasikan besaran kontribusi *losses* oleh setiap generator terhadap sistem *multi-machine*. Hasil inilah yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan penyederhanaan sistem *multi-machine* menjadi *single machine to infinite bus*.

4.4 Hasil Power Flow Tracing Daya Reaktif

Untuk melakukan analisis kestabilan transien menggunakan *Equal Area Criterion* (EAC), dibutuhkan data pada saat kondisi *steady state* dan pada kondisi setelah gangguan (*post fault*). Dengan kasus hubung singkat 3 fasa terjadi pada saluran Balaraja-Cikupa. Hasil dari *power flow tracing* daya reaktif ini akan digunakan dalam proses pembentukan *single machine to infinite bus* (SMIB) dala menentukan nilai saluran pada SMIB.

4.4.1 Kondisi Steady State

Pada kondisi ini, sistem berjalan dengan normal. Seperti yang terdapat pada sub-bab 2.6 mengenai kaitannya dalam pembentukan *branchmark* SMIB kondisi ini diperlukan dalam menentukan nilai reaktansi Xb dan Xc. Pada kondisi *steady state* ini penulis sebut dalam kondisi 1. Pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 merupakan rekap hasil dari hasil *power flow tracing* daya reaktif. Pada Tabel 4.5 merupakan kontribusi *losses* pada saluran pembangkit terhadap sistem dan untuk Tabel 4.6 merupakan kontribusi *losses* dari saluran yang menghasilkan *line charging*.

Tabel 4.6 Kontribusi *Losses* Generator PFT Daya Reaktif Kondisi 1

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
Suralaya Baru	PLTU Slaya Baru	-0.94731059
	PLTU Slaya4	5.29511594
	PLTU Slaya5	3.063431304
	PLTU Slaya6	3.063431304
	PLTU Slaya7	4.479028692
Muara Tawar	PLTGU Mtwar Gb1.1	-0.319763907
	PLTGU Mtwar Gb1.2	-0.319763907
	PLTGU Mtwar St1.0	15.15388092

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
	PLTGU Mtwar Gt 5.1	-3.889663231
	PLTGU Mtwar 2.0	7.807352675
	PLTGU Mtwar 3.0	7.807352675
	PLTGU Mtwar 4.0	7.807352675
Tanjung Jati	PLTU Tjati 3	43.30259989
	PLTU Tjati 4	43.11278469
	PLTU Tjati 5	48.03661854
	PLTU Tjati 6	48.03661854
Gresik	PLTGU Gresik 3	12.3481889
	PLTGU Jawa 3.1	13.78629906
	PLTGU Jawa 3.2	24.48561589
Cirata	PLTA Cirata1	-2.241506049
	PLTA Cirata2	-2.241506049
	PLTA Cirata3	-2.241506049
	PLTA Cirata4	-2.241506049
Grati	PLTGU Grati Gb1.1	7.01945281
	PLTGU Grati Gb1.2	2.120639352
	PLTGU Grati Gb1.3	2.120639352
	PLTGU Grati Sb1.0	13.32327195
	PLTGU Grati Sb2.0	8.598803762
Saguling	PLTA Saguling1	-8.036471517
	PLTA Saguling2	-8.036471517
Adipala	PLTU Adipala	24.75757046
Cilacap	PLTU Cilacap1	26.64847009
	PLTU Cilacap2	50.14430606
Paiton	PLTU Paiton3	65.1933661
	PLTU Paiton5	38.47599976

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
	PLTU Paiton6	38.47599976
	PLTU Paiton7	38.47599976
	PLTU Paiton8	38.47599976
Priok	PLTGU Priok	34.49051708
Bojanegara	PLTU Bojanegara1	25.90076965
	PLTU Bojanegara2	25.90076965
Tanara	PLTU Tanara1	43.33687389
	PLTU Tanara2	43.33687389
Cirebon	PLTU Cirebon	50.21666894
Indramayu	PLTU Indramayu	50.7302901
Tj. Jati-SS	PLTU Tjatia-SS1	30.15480883
	PLTU Tjatia-SS2	30.20723547
Cisokan	PLTA Cisokan1	9.984966856
	PLTA Cisokan2	9.984966856
	PLTA Cisokan3	9.984966856
Cilamaya	PLTGU Cilamaya1	-6.118669534
	PLTGU Cilamaya2	-6.118669534
Jateng	PLTU Jateng1	35.14104174
	PLTU Jateng2	35.14104174
Banten	PLTU Banten	22.13224397
TOTAL		1055.307418

Tabel 4.7 Kontribusi *Losses* Saluran PFT Daya Reaktif Kondisi I

From	To	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
Suralaya Baru	Suralaya	-0.816591947
Cawang	Bekasi	-0.44054671
Tuntang	Pedan	-122.3133163
Cawang	Muara Tawar	-6.839136863
Ungaran	Tuntang	-6.164592914
Cilegon	Suralaya	-6.833822057
Suralaya	Balaraja	-17.98557355
Gresik	Tandes	-2.344589059
Surabaya Sel	Grati	-30.91541876
Ujung Berung	Mandiracan	-33.48560492
Paiton	Watudodol	-493.7765389
Kediri	Bangil	-191.2800654
Ungaran	Ngimbang	-93.0888767
Ngimbang	Krian	-30.76647959
Gresik	Krian	-26.43812173
Ungaran	Krian	-280.8448082
Krian	Grati	-218.7267809
Depok	Gandul	-0.495448457
Depok	Cibinong	-3.484217191
Bangil	Paiton	-193.5490699
Pemalang	Mandiracan	-530.2378783
Watudodol	Segararupek	-11.95681072
Cirata	Saguling	-28.34384826
Saguling	Bandung Sel	-71.03907808
Ujung Berung	Bandung Sel	-31.29892996
Bandung Sel	Mandiracan	-282.0024079
Tasik	Kesugihan	-338.7125768

From	To	Kontribusi Losses (MVAR)
Kesugihan	Adipala	-9.696359949
Adipala	Cilacap	-1.083232969
Kesugihan	Pedan	-518.0895921
Segararupek	Antosari	-79.46158869
Pedan	Kediri	-583.3823282
Paiton	Grati	-111.8965507
Kembangan	Gandul	-55.50991217
Banten	Suralaya Baru	-0.640404188
Banten	Bojanegara	-38.37296139
Bojanegara	Balaraja	-15.13697699
Tanara	Balaraja	-2.3312357
Priok	Muara Tawar	-4.767694475
Muara Karang	Durikosambi	-3.356389695
Muara Karang	Priok	-3.871616069
Kembangan	Durikosambi	-0.245161097
Kembangan	Balaraja	-0.424958326
Cikupa	Balaraja	-1.070337075
Cikupa	Lekong	-3.72398773
Lekong	Gandul	-8.618492615
Cilegon	Bogor	-57.52266316
Bogor	Depok	-5.485640287
Cigereleng	Tasik	-227.593768
Bogor	Cigereleng	-75.77557526
Bekasi	Muara Tawar	-1.731931999
Cilamaya	Cibatu Baru	-42.62524116
Muara Tawar	Cibatu Baru	-16.69579025
Cibatu Baru	Cibatu	-2.395189261

From	To	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
Deltamas	Cibatu	-0.494247976
Cirata	Deltamas	-24.70696839
Tj Jati - SS	Pemalang	-609.2620975
Jateng	Pemalang	-48.911727
Pemalang	Ungaran	-232.9328951
Pemalang	Tanjung Jati	-586.9047399
Tanjung Jati	Ungaran	-316.9685788
Cirebon	Mandiracan	-28.67596764
Indramayu	Tj Jati - SS	-104.726759
Deltamas	Indramayu	-36.61002239
Cigereleng	Bandung Sel	-14.24186353
Bekasi	Tambun	-24.03574162
Cibinong	Tambun	-5.777574417
Cibinong	Cisokan	-43.15834754
Cisokan	Saguling	-25.05376009
Bogor	Cibinong	-4.251524154
TOTAL		-7032.399525

Pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 jika kontribusi *losses* bernilai negatif, artinya *losses* tersebut tidak menyerap sumber daya reaktif melainkan memberikan suplai daya reaktif pada sistem. Hal ini terjadi, bisa dikarenakan adanya fenomena *line charging* yang berpengaruh pada nilai kontribusi *losses* daya reaktif. Sehingga, sistem akan mendapatkan tambahan suplai daya reaktif. Fenomena *line charging* merupakan peristiwa penambahan daya reaktif terhadap suatu saluran transmisi. Penambahan ini disebabkan karena pada saluran yang panjang, sehingga timbul pengaruh kapasitansi saluran terhadap tanah. Sehingga dalam pemodelannya, seolah-olah pada saluran transmisi tersebut terdapat kompensasi daya reaktif. Hal ini mengakibatkan meningkatnya tegangan pada sisi kirim dan meningkatnya daya reaktif yang di transmisikan sistem. Peningkatan daya reaktif menimbulkan drop tegangan dan rugi-

rugi pada jaringan transmisi. Berbeda halnya dengan kontribusi *losses* daya aktif, pada kontribusi *losses* daya aktif suatu sistem bernilai positif yang artinya *losses* tersebut menyerap daya aktif yang ada pada sistem dikarenakan adanya rugi-rugi daya pada saluran transmisi ataupun peralatan.

Untuk memastikan bahwa hasil dari *power flow tracing* sudah tepat atau belum, dapat dibandingkan rekap hasil keseluruhan terhadap hasil total *losses* pada hasil *load flow*. Hasil dari Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 dapat divalidasi dengan total nilai *losses* hasil dari *running load flow* yang terdapat pada sub-bab 4.2. Jika dibandingkan total *losses* hasil *load flow* (Tabel 4.2) dengan total *losses* hasil dari PFT daya reaktif dapat diamati pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perbandingan PFT & Load Flow Daya Reaktif Kondisi I

	Hasil PFT Generator	Hasil PFT Saluran	Hasil PFT Sistem	Hasil Load Flow	%Error
Daya Reaktif MVAR	1055.3074	-7032.3995	-5977.092	-5977.1	0.000132

Pada Tabel 4.8 hasil dari *power flow tracing* daya treaktif ini mendekati dengan hasil dari *running load flow* dengan nilai *error* **0,000132%**. Dengan demikian, hasil *power flow tracing* daya reaktif ini dapat dikatakan merepresentasikan besaran kontribusi *losses* oleh setiap generator terhadap sistem *multi-machine*. Hasil inilah yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan penyederhanaan sistem *multi-machine* menjadi *single machine to infinite bus* untuk menghitung reaktansi Xb dan Xc.

4.4.2 Kondisi Post Fault

Pada kondisi ini, telah terjadi gangguan dan CB telah beroperasi seperti yang terdapat pada sub-bab 2.6.1. Kaitannya dalam pembentukan *branchmark* SMIB, kondisi ini diperlukan dalam menentukan nilai reaktansi Xa. Kondisi ini penulis sebut dalam kondisi 2. Pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 merupakan rekap hasil dari hasil *power flow tracing* daya reaktif. Pada Tabel 4.9 merupakan kontribusi *losses* pada saluran pembangkit terhadap sistem dan Tabel 4.10 merupakan kontribusi *losses* dari saluran yang terjadi fenomena *line charging*.

Tabel 4.9 Kontribusi *Losses* Generator PFT Daya Reaktif Kondisi2

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	Kontribusi <i>Losses</i> (MVAR)
Suralaya Baru	PLTU Slaya Baru	14.48522731
	PLTU Slaya4	16.95748486
	PLTU Slaya5	22.18021235
	PLTU Slaya6	22.18021235
	PLTU Slaya7	28.40503053
Muara Tawar	PLTGU Mtwar Gb1.1	-0.614413953
	PLTGU Mtwar Gb1.2	-0.614413953
	PLTGU Mtwar St1.0	14.99071672
	PLTGU Mtwar Gt 5.1	-3.169459662
	PLTGU Mtwar 2.0	7.522483459
	PLTGU Mtwar 3.0	7.522483459
	PLTGU Mtwar 4.0	7.522483459
Tanjung Jati	PLTU Tjati 3	43.33548215
	PLTU Tjati 4	43.14552202
	PLTU Tjati 5	48.06705981
	PLTU Tjati 6	48.06705981
Gresik	PLTGU Gresik 3	12.3570022
	PLTGU Jawa 3.1	13.61700936
	PLTGU Jawa 3.2	24.21705819
Cirata	PLTA Cirata1	-5.123994239
	PLTA Cirata2	-5.123994239
	PLTA Cirata3	-5.123994239
	PLTA Cirata4	-5.123994239
Grati	PLTGU Grati Gb1.1	7.023295152
	PLTGU Grati Gb1.2	1.98704855
	PLTGU Grati Gb1.3	1.98704855
	PLTGU Grati Sb1.0	13.331766
	PLTGU Grati Sb2.0	8.51649795
Saguling	PLTA Saguling1	-13.3264624
	PLTA Saguling2	-13.3264624
Adipala	PLTU Adipala	24.83027064
Cilacap	PLTU Cilacap1	26.71787585
	PLTU Cilacap2	50.25982654

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	Kontribusi Losses (MVAR)
Paiton	PLTU Paiton3	65.22130747
	PLTU Paiton5	38.4962546
	PLTU Paiton6	38.4962546
	PLTU Paiton7	38.4962546
	PLTU Paiton8	38.4962546
Priok	PLTGU Priok	35.16639293
Bojanegara	PLTU Bojanegara1	26.42950438
	PLTU Bojanegara2	26.42950438
Tanara	PLTU Tanara1	79.58848265
	PLTU Tanara2	79.58848265
Cirebon	PLTU Cirebon	26.34549629
Indramayu	PLTU Indramayu	48.91404176
Tj. Jati-SS	PLTU Tjatia-SS1	30.22266629
	PLTU Tjatia-SS2	30.27520826
Cisokan	PLTA Cisokan1	7.957641667
	PLTA Cisokan2	7.957641667
	PLTA Cisokan3	7.957641667
Cilamaya	PLTGU Cilamaya1	-11.28827309
	PLTGU Cilamaya2	-11.28827309
Jateng	PLTU Jateng1	35.20602033
	PLTU Jateng2	35.20602033
Banten	PLTU Banten	24.68916065
TOTAL		1156.242654

Tabel 4.10 Kontribusi *Losses* Saluran PFT Daya Reaktif Kondisi2

<i>From</i>	<i>To</i>	Kontribusi Losses (MVAR)
Suralaya Baru	Suralaya	-0.295513257
Cawang	Bekasi	-0.464820507
Tuntang	Pedan	-121.616718
Cawang	Muara Tawar	-5.824948698
Ungaran	Tuntang	-5.927237824
Cilegon	Suralaya	0.660030452
Suralaya	Balaraja	6.209543427

<i>From</i>	<i>To</i>	Kontribusi Losses (MVAR)
Gresik	Tandes	-2.340604275
Surabaya Sel	Grati	-30.87103111
Ujung Berung	Mandiracan	-33.30320445
Paiton	Watudodol	-494.5927703
Kediri	Bangil	-191.1435195
Ungaran	Ngimbang	-74.586353
Ngimbang	Krian	-54.2708823
Gresik	Krian	-27.32772442
Ungaran	Krian	-279.0470454
Krian	Grati	-217.7730779
Depok	Gandul	-0.66111257
Depok	Cibinong	-2.463259891
Bangil	Paiton	-199.5137064
Pemalang	Mandiracan	-488.0524407
Watudodol	Segararupek	-11.9420989
Cirata	Saguling	-30.81930821
Saguling	Bandung Sel	-58.51852131
Ujung Berung	Bandung Sel	-24.09294995
Bandung Sel	Mandiracan	-235.7592725
Tasik	Kesugihan	-347.4229927
Kesugihan	Adipala	-29.93199638
Adipala	Cilacap	-2.853187033
Kesugihan	Pedan	-566.7979848
Segararupek	Antosari	-79.13090247
Pedan	Kediri	-575.2449351
Paiton	Grati	-111.7040777
Kembangan	Gandul	-7.406323392
Banten	Suralaya Baru	-0.238155507
Banten	Bojanegara	-9.986565509
Bojanegara	Balaraja	9.06358224
Tanara	Balaraja	7.339333812
Priok	Muara Tawar	-4.185829178
Muara Karang	Durikosambi	-2.716687881
Muara Karang	Priok	-2.881606045
Kembangan	Durikosambi	-1.030902755

<i>From</i>	<i>To</i>	Kontribusi Losses (MVAR)
Kembangan	Balaraja	5.957830993
Cikupa	Lekong	-2.82516206
Lekong	Gandul	-2.728003183
Cilegon	Bogor	0.138219211
Bogor	Depok	-4.641361359
Cigereleng	Tasik	-131.4398786
Bogor	Cigereleng	-57.68568149
Bekasi	Muara Tawar	-2.221413748
Cilamaya	Cibatu Baru	-34.5154364
Muara Tawar	Cibatu Baru	-14.17534683
Cibatu Baru	Cibatu	-2.142831462
Deltamas	Cibatu	-0.474064941
Cirata	Deltamas	-24.67024641
Tj Jati - SS	Pemalang	-600.178201
Jateng	Pemalang	-59.86242697
Pemalang	Ungaran	-237.4008145
Pemalang	Tanjung Jati	-614.7877943
Tanjung Jati	Ungaran	-314.666912
Cirebon	Mandiracan	-23.41560048
Indramayu	Tj Jati - SS	-97.85503259
Deltamas	Indramayu	-33.6311686
Cigereleng	Bandung Sel	-11.31265015
Bekasi	Tambun	-1.491793656
Cibinong	Tambun	-49.0613269
Cibinong	Cisokan	-26.25908852
Cisokan	Saguling	-16.28647352
Bogor	Cibinong	-3.012199297
TOTAL		-6670.112637

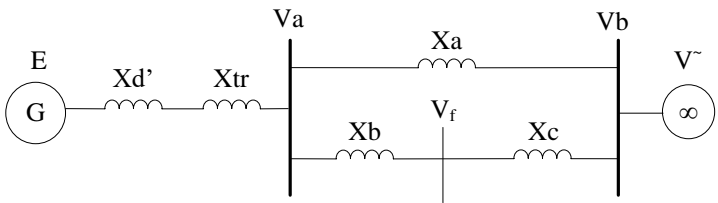
Dari total hasil pada **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10** jika dijumlahkan maka:

Total losses generator + total losses line charging

$$1156.242654 + (-6670.112637) = -5513.869983 \text{ MVAR}$$

4.5 Pembentukan SMIB

Dalam pembentukan menjadi SMIB terdapat beberapa parameter dalam konsep *multi-machine to single-machine*. Parameter-parameter tersebut yaitu nilai reaktansi pada saluran (X_a , X_b , dan X_c), impedansi trafo (X_t), impedansi generator (X_d'), dan tegangan internal generator (E_g). Untuk parameter X_t dan X_d' terdapat pada tabel 3.3. Parameter-parameter tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.1 Benchmark Single Machine to Infinite Bus

4.5.1 Saluran X1, X2, dan X3

Berdasarkan pada sub-bab 2.7.1 yang membahas mengenai tiga kondisi dalam menentukan grafik *equal area criterion*, dengan menggunakan persamaan-persamaan pada sub-bab 2.7.1 untuk menentukan kondisi saat normal (X1), kondisi saat gangguan (X2), dan kondisi setelah gangguan (X3) dengan menggunakan program MATLAB, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 4.11. Hasil Saluran X1, X2, dan X3 Sistem SMIB

No.	Nama Pembangkit	X1	X2	X3	E
1	PLTU Slaya Baru	0.058	0.3124	0.0683	1.0202
2	PLTU Slaya4	0.075	0.3051	0.0882	1.0187
3	PLTU Slaya5	0.062	0.3813	0.0717	1.0285
4	PLTU Slaya6	0.062	0.3813	0.0717	1.0285
5	PLTU Slaya7	0.0618	0.3976	0.0717	1.0292
6	PLTGU Mtwar Gb1.1	0.0834	0.0742	0.0821	1.0033
7	PLTGU Mtwar Gb1.2	0.0834	0.0742	0.0821	1.0033
8	PLTGU Mtwar St1.0	0.1429	0.0988	0.1402	1.0149
9	PLTGU Mtwar Gt 5.1	0.0514	0.076	0.0535	1.0033

No.	Nama Pembangkit	X1	X2	X3	E
10	PLTGU Mtwar 2.0	0.1242	0.0841	0.1213	1.0111
11	PLTGU Mtwar 3.0	0.1242	0.0841	0.1213	1.0111
12	PLTGU Mtwar 4.0	0.1242	0.0841	0.1213	1.0111
13	PLTU Tjati 3	0.0917	0.0919	0.0917	1.0613
14	PLTU Tjati 4	0.0916	0.0918	0.0916	1.0612
15	PLTU Tjati 5	0.0602	0.0608	0.0602	1.0568
16	PLTU Tjati 6	0.0602	0.0608	0.0602	1.0568
17	PLTGU Gresik 3	0.146	0.146	0.146	1.0107
18	PLTGU Jawa 3.1	0.1571	0.1471	0.1568	1.0421
19	PLTGU Jawa 3.2	0.0962	0.0857	0.096	1.0433
20	PLTA Cirata1	0.0688	0.1048	0.0177	1.0012
21	PLTA Cirata2	0.0688	0.1048	0.0177	1.0012
22	PLTA Cirata3	0.0688	0.1048	0.0177	1.0012
23	PLTA Cirata4	0.0688	0.1048	0.0177	1.0012
24	PLTGU Grati Gb1.1	0.1921	0.192	0.1921	1.0076
25	PLTGU Grati Gb1.2	0.0994	0.0931	0.0979	1.0034
26	PLTGU Grati Gb1.3	0.0994	0.0931	0.0979	1.0034
27	PLTGU Grati Sb1.0	0.147	0.147	0.147	1.0117
28	PLTGU Grati Sb2.0	0.3064	0.2959	0.3058	1.0453
29	PLTA Saguling1	0.023	0.2214	0.0745	1.0068
30	PLTA Saguling2	0.023	0.2214	0.0745	1.0068
31	PLTU Adipala	0.0798	0.0799	0.0798	1.0355
32	PLTU Cilacap1	0.0781	0.0782	0.0781	1.0363
33	PLTU Cilacap2	0.0605	0.0615	0.0605	1.0524
34	PLTU Paiton3	0.0722	0.0738	0.0723	1.0579
35	PLTU Paiton5	0.0786	0.0801	0.0786	1.0415
36	PLTU Paiton6	0.0786	0.0801	0.0786	1.0415
37	PLTU Paiton7	0.0786	0.0801	0.0786	1.0415
38	PLTU Paiton8	0.0786	0.0801	0.0786	1.0415
39	PLTGU Priok	0.0647	0.0088	0.064	1.0458
40	PLTU Bojanegara1	0.0522	0.0657	0.0525	1.0477
41	PLTU Bojanegara2	0.0522	0.0657	0.0525	1.0477

No.	Nama Pembangkit	X1	X2	X3	E
42	PLTU Tanara1	0.0551	0.5519	0.0627	1.053
43	PLTU Tanara2	0.0551	0.5519	0.0627	1.053
44	PLTU Cirebon	0.0587	0.2214	0.0531	1.0523
45	PLTU Indramayu	0.0587	0.0302	0.0582	1.0548
46	PLTU Tjatia-SS1	0.0962	0.0962	0.0962	1.0532
47	PLTU Tjatia-SS2	0.0962	0.0962	0.0962	1.0532
48	PLTA Cisokan1	0.2105	0.0177	0.2036	1.0479
49	PLTA Cisokan2	0.2105	0.0177	0.2036	1.0479
50	PLTA Cisokan3	0.2105	0.0177	0.2036	1.0479
51	PLTGU Cilamaya1	0.0563	0.0691	0.0545	1.0286
52	PLTGU Cilamaya2	0.0563	0.0691	0.0545	1.0286
53	PLTU Jateng1	0.0646	0.0646	0.0646	1.0513
54	PLTU Jateng2	0.0646	0.0646	0.0646	1.0513
55	PLTU Banten	0.0799	0.1594	0.0815	1.0398

Pada hasil Tabel 4.11, hasil dari internal generator (E) diperoleh dari persamaan (2.77) yang akan menjadi rumusan dalam penentuan nilai daya elektrik pada kurva *equal area criterion*.

4.6 Hasil Analisis Kestabilan Transien dengan EAC

Hasil analisis kestabilan transien dengan metode *equal area criterion* (EAC) ini merupakan hasil simulasi pada MATLAB dengan mengamati beberapa generator dengan kasus hubung singkat tiga fasa terjadi pada saluran Balaraja-Cikupa. Dari hasil ini nantinya dapat diketahui nilai waktu pemutus kritis dari masing-masing karakteristik generator. Dan dari hasil-hasil tersebut, akan dipilih waktu yang tercepat dalam menentukan prediksi waktu pemutus kritis. Hal ini dikarenakan sistem yang di analisis adalah sistem SMIB dengan pengamatan generator yang berbeda-beda. Jika dipilih waktu pemutus kritis yang tercepat saat terjadinya gangguan, maka kemampuan sistem dalam mengisolir gangguan lebih cepat dan sistem akan lebih mampu mempertahankan keadaan stabilnya. Parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan kestabilan transien dengan konsep *equal area criterion*, yaitu sebagai berikut:

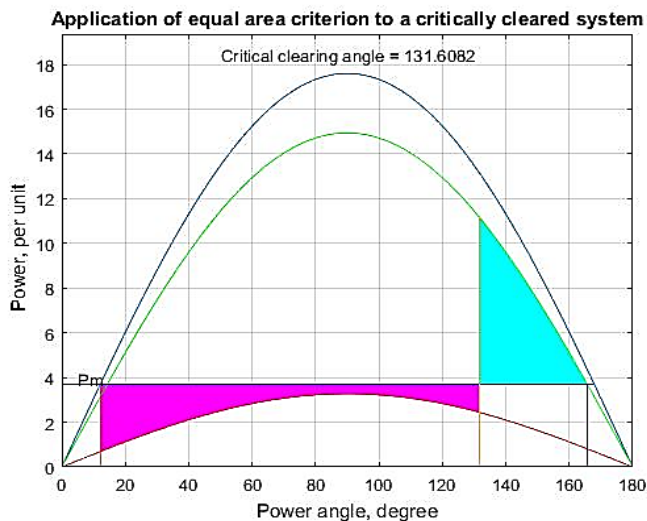
P_m : Daya Mekanis Turbin (p.u)
 E : Tegangan Internal Generator (p.u)
 X_1 : Reaktansi Total Kondisi Sebelum Gangguan (p.u)
 X_2 : Reaktansi Total Kondisi Saat Gangguan (p.u)
 X_3 : Reaktansi Total Kondisi Setelah Gangguan (p.u)

Parameter Nilai P_m diperoleh pada Tabel 3.3, parameter E diperoleh dari persamaan (2.77), parameter X_1 diperoleh dari persamaan (2.81), parameter X_2 diperoleh dari persamaan (2.84), parameter X_3 dari persamaan (2.87). Berdasarkan dengan data-data yang telah diketahui dan persamaan-persamaan pada Bab 2 dan Bab 3, hasil pada generator dalam kondisi stabil kritis diperoleh hasil sebagai berikut:

4.6.1 Generator 1

Generator 1 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Suralaya Baru**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$P_m = 3,7$ p.u	$X_1 = 0,058$ p.u
$E = 1,0202$ p.u	$X_2 = 0,3124$ p.u
	$X_3 = 0,0683$ p.u



Gambar 4.2 Hasil Simualasi EAC Sistem 1

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.2. Hasil EAC dari sistem 1 yaitu sebagai berikut:

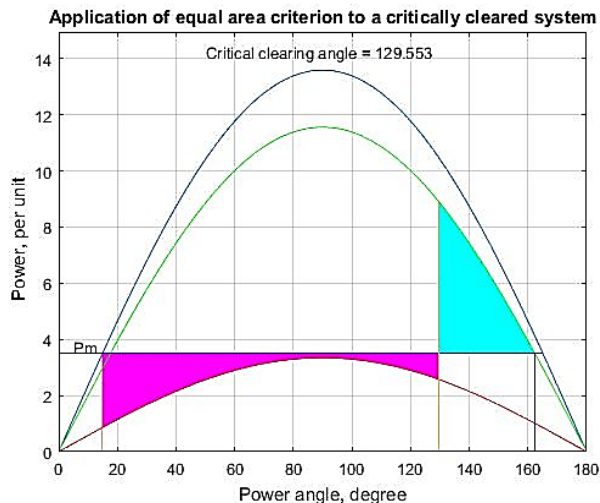
$P_{e1} \text{ max}$	$= 17,5997$	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	$= 3,2653$	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	$= 14,9389$	p.u
Sudut Awal (d_0)	$= 12,136^0$	
Sudut Kritis (d_c)	$= 131,608^0$	
Sudut Maksimum (d_{maks})	$= 165,66^0$	
Prediksi Nilai CCT	$= 0,1694$	detik

4.6.2 Generator 2

Generator 2 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Suralaya-4**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$P_m = 3,5$	p.u	$X_1 = 0,075$	p.u
$E = 1,0187$	p.u	$X_2 = 0,3051$	p.u
		$X_3 = 0,0882$	p.u

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil EAC terdapat pada Gambar 4.3 sebagai berikut:



Gambar 4.3 Hasil Simulasi EAC Sistem 2

Dan untuk hasil EAC dari sistem 2 yaitu sebagai berikut:

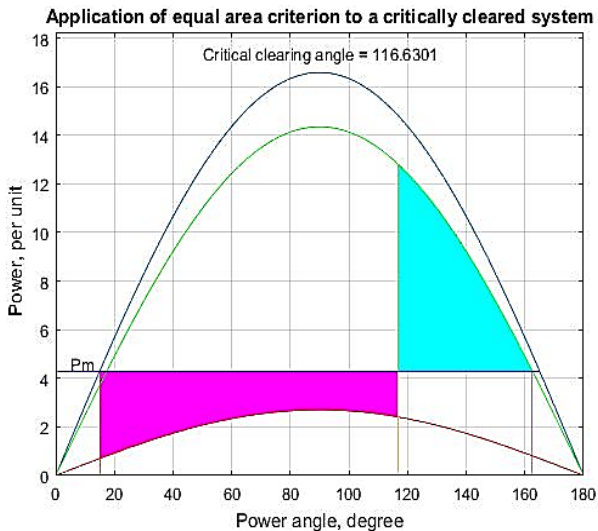
$P_{e1} \text{ max}$	$= 13,5888$	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	$= 3,3389$	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	$= 11,556$	p.u
Sudut Awal (d_0)	$= 14,926^0$	
Sudut Kritis (d_c)	$= 129,553^0$	
Sudut Maksimum (d_{maks})	$= 162,37^0$	
Prediksi Nilai CCT	$= 0,103$	detik

4.6.3 Generator 3

Generator 3 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Suralaya-5**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$P_m = 4,3$	p.u	$X_1 = 0,062$	p.u
$E = 1,0285$	p.u	$X_2 = 0,3813$	p.u
		$X_3 = 0,0717$	p.u

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.4 sebagai berikut:



Gambar 4.4 Hasil Simualasi EAC Sistem 3

Hasil EAC pada sistem 3 yaitu sebagai berikut:

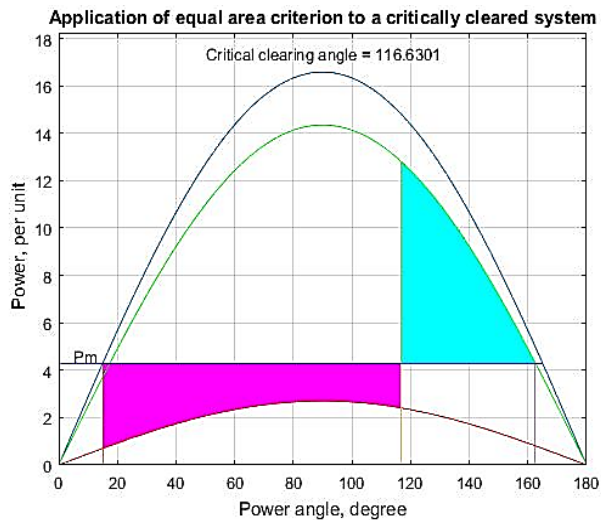
$P_{e1 \text{ max}}$	= 16,5853	p.u
$P_{e2 \text{ max}}$	= 2,6974	p.u
$P_{e3 \text{ max}}$	= 14,3495	p.u
Sudut Awal (d_0)	= 15,027 ⁰	
Sudut Kritis (d_c)	= 116,63 ⁰	
Sudut Maksimum (d_{maks})	= 162,563 ⁰	
Prediksi Nilai CCT	= 0,095	detik

4.6.4 Generator 4

Generator 4 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada PLTU **Suralaya-6**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$X1 = 0,062$	p.u	$P_m = 4,3$	p.u
$X2 = 0,3813$	p.u	$E = 1,0285$	p.u
$X3 = 0,0717$	p.u		

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4.5 Hasil Simulasi EAC Sistem 4

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva *equal area criterion* (EAC) dengan hasil sebagai berikut:

Hasil EAC dari sistem 4 yaitu sebagai berikut:

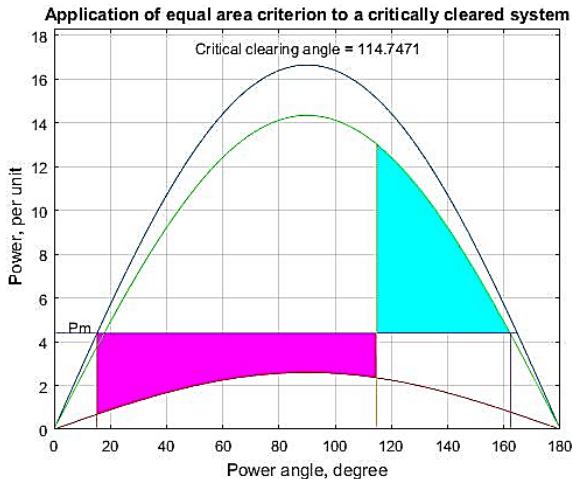
$P_{e1} \text{ max}$	= 16,5853	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	= 2,6974	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	= 14,3495	p.u
Sudut Awal (d_0)	= 15,027 ⁰	
Sudut Kritis (d_c)	= 116,63 ⁰	
Sudut Maksimum (d_{maks})	= 162,563 ⁰	
Prediksi Nilai CCT	= 0,095	detik

4.6.5 Generator 5

Generator 5 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Suralaya-7**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$X1$	= 0,0618 p.u	P_m	= 4,38 p.u
$X2$	= 0,3976 p.u	E	= 1,0292 p.u
$X3$	= 0,0717 p.u		

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil EAC terdapat pada Gambar 4.6 sebagai berikut:



Gambar 4.6 Hasil Simualasi EAC Sistem 5

Hasil EAC pada sistem 5 yaitu sebagai berikut:

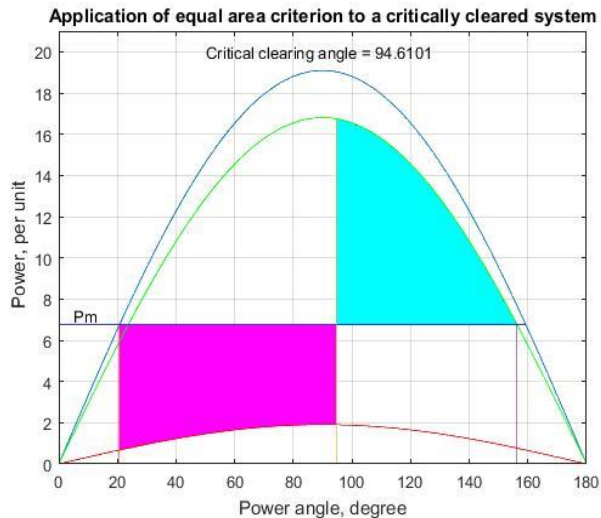
$P_{e1 \text{ max}}$	= 16,65	p.u
$P_{e2 \text{ max}}$	= 2,5882	p.u
$P_{e3 \text{ max}}$	= 14,3446	p.u
Sudut Awal (d_0)	= 15,252 ⁰	
Sudut Kritis (d_c)	= 114,747 ⁰	
Sudut Maksimum (d_{maks})	= 162,221 ⁰	
Prediksi Nilai CCT	= 0,0932	detik

4.6.6 Generator 6

Generator 6 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Tanara-1**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$X1$	= 0,0551 p.u	P_m	= 6,75 p.u
$X2$	= 0,5519 p.u	E	= 1,053 p.u
$X3$	= 0,0627 p.u		

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



Gambar 4.7 Hasil Simualasi EAC Sistem 6

Hasil EAC dari kondisi sistem 6 yaitu sebagai berikut:

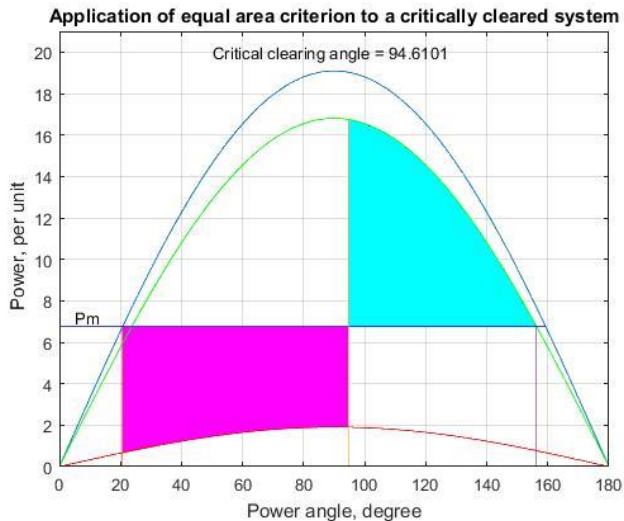
$P_{e1} \text{ max}$	$= 19,093$	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	$= 1,9077$	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	$= 6,8046$	p.u
Sudut Awal (d_0)	$= 20,704^0$	
Sudut Kritis (d_c)	$= 94,6101^0$	
Sudut Maksimum (d_{maks})	$= 156,3171^0$	
Prediksi Nilai CCT	$= 0,0715$	detik

4.6.7 Generator 7

Generator 7 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Tanara-2**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$X1$	$= 0,0551$	p.u	P_m	$= 6,75$	p.u
$X2$	$= 0,5519$	p.u	E	$= 1,053$	p.u
$X3$	$= 0,0627$	p.u			

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.8. Sebagai berikut:



Gambar 4.8 Hasil Simualasi EAC Sistem 7

Hasil EAC dari sistem 7 yaitu sebagai berikut:

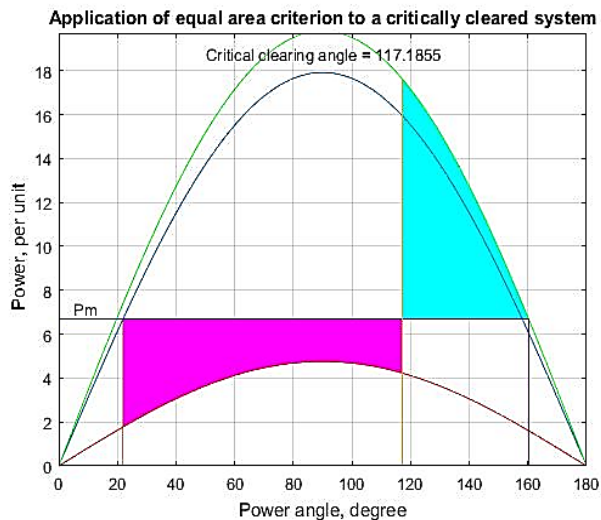
$P_{e1 \text{ max}}$	$= 19,093$	p.u
$P_{e2 \text{ max}}$	$= 1,9077$	p.u
$P_{e3 \text{ max}}$	$= 6,8046$	p.u
Sudut Awal (d_0)	$= 20,704^0$	
Sudut Kritis (d_c)	$= 94,6101^0$	
Sudut Maksimum (d_{maks})	$= 156,3171^0$	
Prediksi Nilai CCT	$= \mathbf{0,0715}$	detik

4.6.8 Generator 8

Generator 8 pada hasil simulasi MATLAB dengan sistem SMIB merupakan generator pada **PLTU Cirebon**. Dengan diketahui parameter-parameter pada sistem SMIB sebagai berikut:

$X1 = 0,0587$ p.u	$P_m = 6,7$ p.u
$X2 = 0,2214$ p.u	$E = 1,0523$ p.u
$X3 = 0,0531$ p.u	

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.8. Sebagai berikut:



Gambar 4.9 Hasil Simulasi EAC Sistem 8

Hasil dari kondisi sistem SMIB dengan generator PLTU Cirebon yaitu sebagai berikut:

$P_{e1} \text{ max}$	$= 17,9201$	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	$= 4,7521$	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	$= 19,8084$	p.u
Sudut Awal (d_0)	$= 21,9552^0$	
Sudut Kritis (d_c)	$= 117,1855^0$	
Sudut Maksimum (d_{maks})	$= 160,2303^0$	
Prediksi Nilai CCT	$= \mathbf{0,076}$	detik

Pengamatan hanya dilakukan pada beberapa generator yang mengalami stabil kritis. Penentuan dari generator yang mengalami stabil kritis ini merupakan generator-generator yang terdekat dari sumber gangguan atau generator-generator yang terhubung secara langsung dari bus yang mengalami hubung singkat. Selain itu, faktor besar kecilnya momen inersia pun berpengaruh pada kestabilan generator.

Dari pengamatan beberapa generator yang mengalami stabil kritis, jika diamati dari nilai $X1$, $X2$, dan $X3$ jika dilihat dari daya elektrik yang dihasilkan (P_e), terlihat bahwa nilai pada saat kondisi terjadinya gangguan paling rendah. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.63) dimana nilai $X2$ berbanding terbalik dengan nilai $P_{e_{maks}}$. Sehingga, daya elektrik pada saat gangguan sangatlah rendah, hal ini dikarenakan nilai daya elektrik yang dihasilkan menuju ke *ground*. Dan pada kondisi setelah gangguan, nilai daya elektrik yang dihasilkan lebih besar jika dibandingkan dari nilai daya elektrik pada kondisi awal ($P_{e1 \text{ max}}$). Hal ini dikarenakan, pada kondisi $P_{e3 \text{ max}}$ terjadi pemutusan saluran, sehingga nilai $P_{e3 \text{ max}}$ lebih besar daripada nilai $P_{e1 \text{ max}}$.

Untuk hasil dari prediksi waktu pemutus kritis (CCT), dari beberapa sistem yang diamati, yang tercepat yaitu pada pengamatan SMIB dengan sumber generator PLTU Tanara sebesar **0,0715** detik. Prediksi waktu inilah yang akan dijadikan acuan dalam menentukan nilai CCT sistem *multi-machine*.

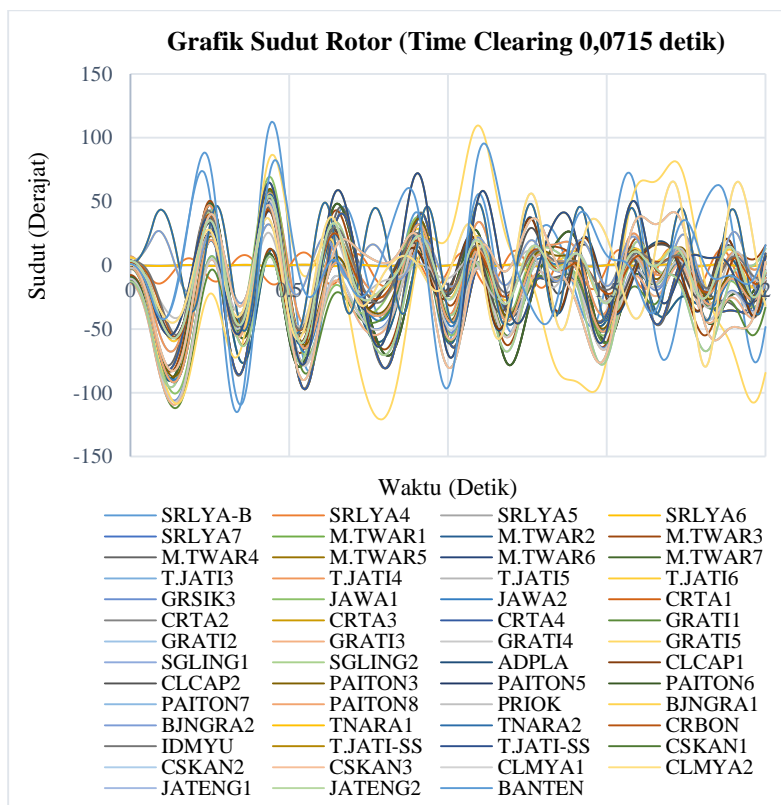
4.7 Validasi Hasil SMIB terhadap *Multi-Machine*

Pada validasi hasil SMIB terhadap *multi-machine* akan dilakukan pengamatan untuk masing-masing generator yang telah diamati pada hasil EAC. Pengujian pada validasi ini dengan menerapkan konsep *multi-machine* dengan metode *time domain simulation* yang memberikan studi

kasus waktu pemutus kritis sesuai hasil prediksi dan waktu pemutus kritis dari analisis *multi-machine*. Waktu pemutus kritis merupakan durasi waktu ketika terjadinya gangguan hingga terbukanya *circuit breaker* pada saluran yang mengalami gangguan.

4.7.1 Pengujian *Multi-Machine* (Time Clearing 0,0715s)

Berdasarkan pengamatan validasi pada setiap generator (sub-bab 4.6), maka dipilih waktu tercepat dari hasil beberapa pengamatan. Dan diperoleh waktu pemutus kritis tercepat yaitu sebesar 0,0715 detik. Berikut merupakan simulasi pada sistem *multi-machine*:

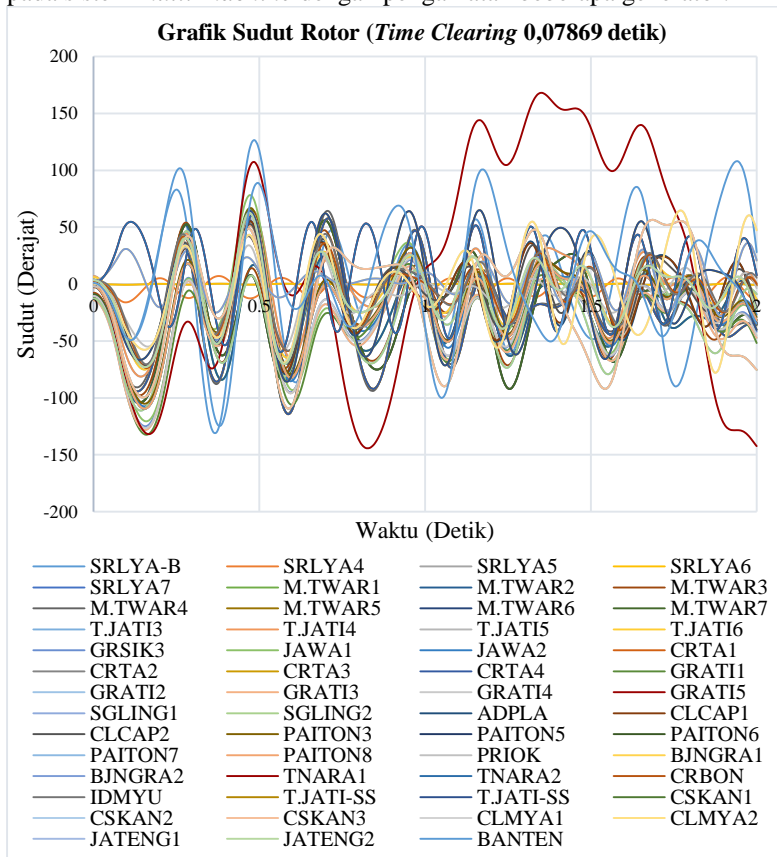


Gambar 4.10 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t = 0,0715$ s

Pada saat nilai *time clearing* bernilai 0,0715 detik menunjukkan bahwa pada sistem *multi-machine*, sistem masih mampu mempertahankan kondisi kestabilannya hingga mencapai sinkron kembali. Hal ini menunjukkan bahwa penentuan nilai *time-clearing* mampu mempertahankan kestabilan sistem.

4.7.2 Pengujian Multi-Machine (Time Clearing 0,07869s)

Dengan pengujian *multi-machine* berbasis *time domain simulation* dengan nilai *time clearing* sebesar 0.07869. Berikut merupakan simulasi pada sistem *multi-machine* dengan pengamatan beberapa generator:

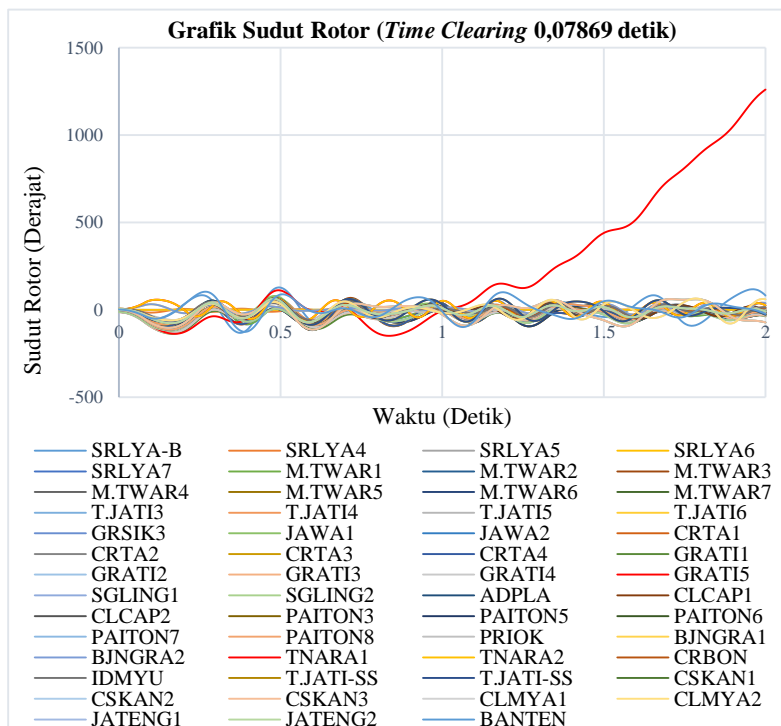


Gambar 4.11 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t = 0,07869$ s

Pada saat nilai *time clearing* bernilai 0,07869 detik menunjukkan bahwa pada sistem *multi-machine*, sistem dalam keadaan stabil kritis. Pada kondisi inilah titik maksimum nilai *time clearing* harus bekerja, artinya *circuit breaker* harus sudah bekerja atau mengisolir gangguan dengan waktu maksimum pada detik ke 0,07869.

4.7.3 Pengujian *Multi-Machine* (*Time Clearing* 0,08 s)

Jika dengan nilai *time clearing* 0,0715 dan 0,07869 sistem masih mampu mempertahankan kestabilannya, maka dilakukan simulasi dengan menetapkan nilai *time clearing* selama 0,08 detik. Hal ini bertujuan untuk mengetahui batas kritis dari ketidakstabilan pada sistem JAMALI dengan kasus hubung singkat pada Balaraja-Cikupa. Berikut merupakan simulasi pada *multi-machine* dengan metode *time domain simulation* pada sistem JAMALI untuk waktu *time clearing* 0,08 detik.



Gambar 4.12 Hasil Simualasi *Multi-Machine*, $t=0,08s$

Pada Gambar 4.12, terlihat bahwa sudut rotor pada generator tidak stabil. Hal ini bisa dilihat dari kurva sudut rotor terhadap waktu pada Gambar 4.12 terus mengalami kenaikan hingga lebih dari 180^0 . Jika diamati lebih rinci, dengan berdasarkan pada standar kestabilan sudut rotor, nilai sudut rotor pada generator yang tidak stabil memiliki nilai lebih dari 180^0 dan tidak mampu kembali pada kondisi sinkron, maka sistem tersebut dikatakan tidak stabil. Ketidakstabilan sudut rotor ini mampu menyebabkan generator lepas sinkron dari sistem.

Jika penerapannya pada sistem *multi-machine* yang saling terhubung satu dengan lainnya, maka jika salah satu generator pada suatu sistem tersebut tidak stabil, maka kestabilan sistem akan berpengaruh pada generator yang lainnya. Oleh sebab itu, dipilihlah nilai *time clearing* pada generator yang paling cepat sebagai dasar dari penentuan nilai *time clearing* terhadap sistem *multi-machine*.

Berdasarkan hasil validasi antara proses berbasis *single machine to infinite bus* dengan sistem *multi-machine* berbasis *time domain simulation*, nilai *time clearing* pada hasil SMIB sedikit lebih cepat jika dibandingkan hasil pengujian pada sistem *multi-machine*. Pada proses *single machine to infinite bus* diperoleh hasil prediksi *time clearing* dengan pengamatan beberapa generator dan dipilih waktu tercepat yang diperoleh hasil 0,0715 detik, sedangkan dengan proses sistem *multi-machine* dengan berbasis *time domain simulation* diperoleh hasil pada nilai *time clearing* sebesar 0,08 detik, sudut rotor mengalami ketidakstabilan. Dengan demikian, hasil dari prediksi penentuan waktu kritis dengan mereduksi sistem *multi-machine* menjadi sistem berbasis *single machine to infinite bus* menggunakan *power flow tracing* masih dalam batas smsn atau stabil. Terdapat sedikit perbedaan hasil pada penentuan waktu kritis antara hasil *multi-machine system* dengan menggunakan *time domain simulation* dengan berbasis *single machine to infinite bus* menggunakan *power flow tracing*, hal ini bisa berdasarkan pada penggunaan metode yang berbeda. Jika pada sistem berbasis SMIB penentuan nilai waktu pemutus kritis berdasarkan pada waktu tercepat dari beberapa generator dari hasil proses *power flow tracing*. Selain itu, hasil dari penentuan waktu pemutus kritis diperoleh berdasarkan dari hasil analisis dengan menggunakan *equal area criterion*, sedangkan pada sistem *multi-machine* dengan metode *time domain simulation* metode perhitungannya berbeda dengan sistem SMIB, namun masih tetap pada dasar perhitungan yang sama yaitu berdasarkan penurunan rumus dari persamaan ayunan sudut rotor. Jika pada sistem *multi-machine*

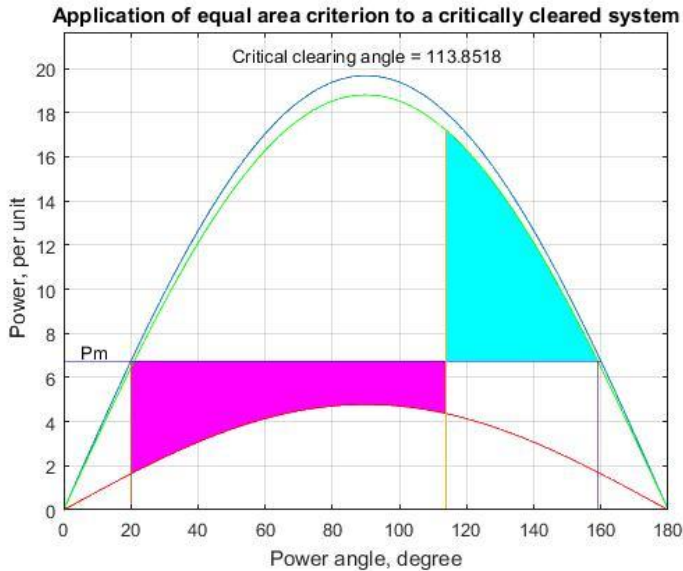
menggunakan metode perhitungan runge kutta yang memiliki beberapa orde dengan beberapa iterasi, sedangkan pada sistem SMIB hanya mengacu pada hasil dari sudut pemutusan kritis oleh masing-masing generator. Pada sistem SMIB, terdapat beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan sistem *multi-machine*, yaitu pada proses analisis SMIB dapat mengetahui nilai sudut pemutus kritis dan *time clearing* pada masing-masing generator yang mengalami stabil kritis. Selain itu, dapat diketahui batas daya maksimum (P_{maks}) dengan menggunakan *equal area criterion* pada masing-masing generator. Kekurangan dari sistem ini yaitu harus menjalankan prosesnya dan mengamati satu per satu dari generator yang terpasang pada sistem.

4.8 Studi Kasus Kontingensi

Jika pada kasus pada sub-bab 4.6 dan 4.7 merupakan studi kasus *single line transimission*, dimana ketika terjadi gangguan pada Balaraja-Cikupa saluran pada Balaraja-Cikupa benar-benar terputus dan tidak ada aliran daya yang mengalir pada saluran Balaraja-Cikupa. Kontingensi adalah kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih saluran transmisi dan atau generator, kontingensi N-1 adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya satu komponen, kontingensi N-k adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya k komponen. Pada studi kasus kontingensi ini merupakan suatu studi kasus dimana terdapat dua saluran transmisi. Ketika terjadi gangguan pada saluran Balaraja-Cikupa, maka hanya salah satu saluran saja yang terputus. Sehingga masih terdapat satu saluran yang menghubungkan Balaraja-Cikupa.

4.8.1 Hasil *Single Machine to Infinite Bus*

Dalam prosedur analisis kestabilan transien akibat kontingensi pada sistem SMIB dilakukan dua proses tahapan, yaitu kondisi normal dan kondisi setelah salah satu saluran Balaraja-Cikupa *open* dari sistem. Pada sistem SMIB untuk studi kasus kontingensi pun juga dilakukan pengamatan pada seluruh generator yang terdapat pada JAMALI 500kV dan dipilih prediksi *time clearing* yang tercepat dari pengamatan seluruh generator. Waktu inilah yang menjadi acuan dalam melakukan prediksi *time clearing*. Untuk studi kasus kontingensi akibat terputusnya salah satu saluran Balaraja-Cikupa, diperoleh hasil sebagai berikut:



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Sistem SMIB (Kontingensi)

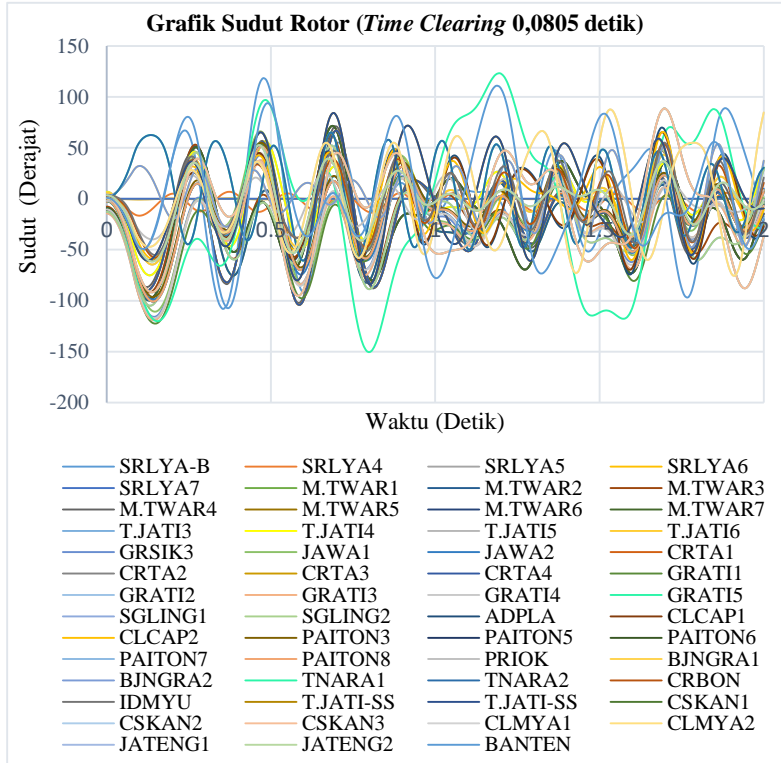
Prediksi *time clearing* pada sistem SMIB dipilih waktu tercepat diantara pengamatan seluruh generator. Diperoleh hasil *time clearing* tercepat yaitu pada Generator Tanara 1 dan Tanara 2. Pada Gambar 4.13 merupakan grafik hasil untuk generator Tanara 1 dan Tanara 2 dengan nilai prediksi *time clearing* 0,0805 detik.

Berdasarkan parameter nilai yang telah diketahui, dengan simulasi menggunakan MATLAB maka hasil kurva EAC terdapat pada Gambar 4.13. Dan untuk hasil EAC yaitu sebagai berikut:

$P_{e1} \text{ max}$	= 19,6797	p.u
$P_{e2} \text{ max}$	= 4,7743	p.u
$P_{e3} \text{ max}$	= 18,8079	p.u
Sudut Awal (d_0)	= 20,059 ⁰	
Sudut Kritis (d_c)	= 113,852 ⁰	
Sudut Maksimum (d_{maks})	= 158,968 ⁰	
Prediksi Nilai CCT	= 0,0805	detik

4.8.2 Hasil Multi-Machine

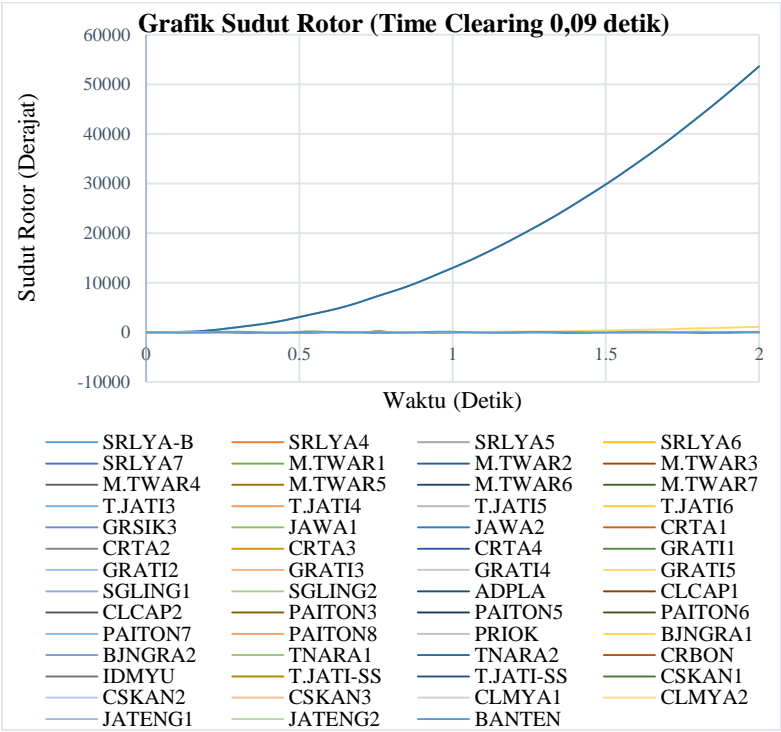
Pada tahapan ini dilakukan validasi dari hasil sistem SMIB. Berdasarkan hasil dari sistem SMIB, diperoleh nilai prediksi *time clearing* 0,0805 detik. Waktu inilah yang akan digunakan untuk validasi terhadap sistem *multi-machine*. Berikut pada Gambar 4.14 merupakan hasil sistem *multi-machine*:



Gambar 4.14 Hasil Kontingensi *Multi-Machine* ($t=0,0805$ s)

Pada Gambar 4.14, dengan nilai *time clearing* 0,0805 detik sistem masih dikatakan stabil, karena sudut tidak melebihi 180 derajat dan mampu kembali dalam keadaan *steady state*. Pada kondisi ini, sistem *multi-machine* dapat dikatakan stabil kritis, terlihat pada grafik untuk detik ke 1-2 mengalami osilasi yang cukup tinggi.

Pada Gambar 4.15, dilakukan simulasi pada sistem *multi-machine* dengan nilai *time clearing* 0,09 detik. Pada simulasi ini, grafik sudut rotor melebihi 180° dan terus meningkat hingga periode waktu tak hingga. Pada kondisi ini, sistem dalam keadaan tidak stabil karena generator tidak mampu mempertahankan nilai sudut rotor. Berikut merupakan hasil simulasi untuk sistem *multi-machine* dengan nilai *time clearing* 0,09 detik.



Gambar 4.15 Hasil Kontingensi *Multi-Machine* ($t=0,09$ s)

Berdasarkan hasil validasi pada sistem *multi-machine* (Gambar 4.14 dan Gambar 4.15), dapat diketahui nilai CCT untuk kasus kontingensi Balaraja-Cikupa yaitu 0,08-0,09 detik. Hasil ini pun juga mendekati dengan hasil SMIB dengan nilai 0,0805 detik untuk kondisi stabil kritisnya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada analisis dan hasil pada tugas akhir ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode *Power Flow Tracing* merupakan metode yang mampu digunakan untuk merepresentasikan sistem *multi-machine* dengan berdasarkan pada konsep pelacakan aliran daya pada bus terhadap saluran dengan menggunakan konsep *extended incidence matrix* yang menunjukkan hubungan saling keterkaitan antara bus dengan saluran. Dengan demikian, konsep metode *power flow tracing* dapat diterapkan pada sistem JAMALI 500 kV.
2. Analisis kestabilan transien dengan menggunakan *equal area criterion* dapat diperoleh hasil pembangkitan pada masing-masing generator. Selain itu, nilai sudut pemutus kritis dan *time clearing* dapat diketahui pada setiap generator.
3. Hasil perbandingan antara sistem *multi-machine* berbasis *time domain simulation* dengan sistem *single machine to infinite bus* (SMIB) berbasis *power flow tracing* terdapat perbedaan. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dengan menggunakan sistem SMIB diperoleh nilai *time clearing* sebesar 0,0715 dan pada sistem *multi-machine* dengan nilai 0,07869 sistem dalam keadaan stabil kritis, dan untuk waktu pemutus kritis 0,08 detik besaran sudut rotor meningkat terus-menerus melebihi batas 180^0 dan tidak mampu kembali pada kondisi sinkron. Dengan demikian, pada nilai waktu pemutus kritis sebesar 0,08 detik sistem sudah dikatakan dalam keadaan tidak stabil.
4. Berdasarkan hasil perbandingan atau validasi antara sistem *multi-machine* berbasis *time domain simulation* (TDS) dengan hasil SMIB berbasis *equal area criterion*, hasil prediksi nilai waktu *time clearing* dari sistem SMIB lebih cepat daripada hasil sistem *multi-machine*. Jika memandang dari segi keamanan, hasil dari SMIB pembentukan dari PFT lebih aman.

5.2 Saran

Setelah dilakukannya analisis dan pengamatan, saran yang mampu memberikan perbaikan yaitu:

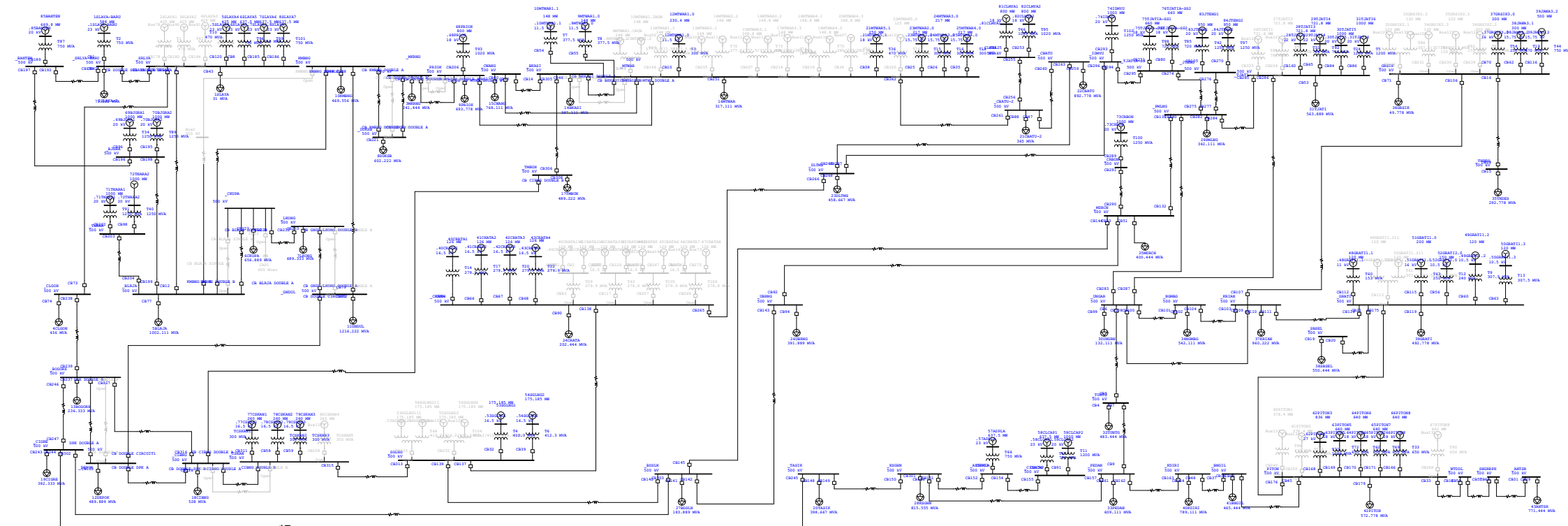
1. Proses pengerjaan pada sistem SMIB pada tugas akhir ini dilakukan berkali-kali dengan pengamatan generator yang berbeda-beda. Selain itu, diperlukan juga proses pengerjaan dengan dua kondisi yang berbeda yaitu pada kondisi *steady state* dan kondisi setelah terjadinya hubung singkat. Saran untuk perbaikan metode ini yaitu perlunya proses pengerjaan yang dilakukan dengan sekali proses sehingga dalam membandingkan antara generator satu dengan yang lainnya lebih mudah.
2. Studi kasus untuk pengamatan kestabilan sudut rotor perlu ditambah guna untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.
3. Pembanding dari hasil metode *power flow tracing* dapat dibandingkan dengan metode yang lainnya yang berbasis sistem *multi-machine*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Companies Ins, 1994.
- [2] Prof. DR. Ir. Adi Soeprijanto M.T., *Analisa Kestabilan Multi Generator dengan Konsep Mesin Tunggal*. Yogyakarta: Deepublish, 2017.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*. Kevin Kane, 1999.
- [4] P. S. R. Murty, *Power System Analysis*. 2007.
- [5] B. M. Weedy, B. J. CORY, JENKINS.N, EKANAYAKE.J.B., and STRBAC.G, *Electric Power Systems*. 2012.
- [6] P. Kundur, G. Anderssin, and Firends, "Definition and Classification of Power System Stability," 2004.
- [7] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, *Power Systems Analysis and Design*. 2011.
- [8] W. D. Stevenson and J. and J. J. Grenger, *Elements of Power System Analysis, 4th Edition*. McGraw-Hill Companies Ins, 1994.
- [9] S. Fitrianto, M. H. Purnomo, and A. Priyadi, "Optimasi Capacitive Energy Storage (CES) Menggunakan Differential Evolution Algorithm Machine Infinite Bus (SMIB) Berdasarkan," vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [10] J. J. Grainger and W. D. J. Stevenson, *Power System Analysis*. 1994.
- [11] T. . Nagsarkar and S. M.S, *Power System Analysis*. 1994.
- [12] Turan Gönen, *Modern power system analysis*, vol. 53. 2013.
- [13] A. Enshae and P. Enshae, "New reactive power flow tracing and loss allocation algorithms for power grids using matrix calculation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 87, pp. 89–98, 2017.
- [14] K. Xie, J. Zhou, and W. Li, "Analytical model and algorithm for tracing active power flow based on extended incidence matrix," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 399–405, 2009.
- [15] ANSI/IEEE Std 399-1980, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis."
- [16] S. R. PS and Dkk, "Buku Pedoman Pemeliharaan Pemisah," 2014.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

One-Line Diagram - JAMALI_500kV_2019 (Transient Stability Analysis)



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Nama : Mohamad Arwan Efendy
Tempat Tanggal Lahir : Bulungan, 26 Desember 1993
Jenis Kelamin : Laki-laki
Agama : Islam
Alamat Rumah : Jl. Jatisari Permai III G-7, Waru-Sidoarjo
Telepon : 081223036235
E-mail : muhammadarwanefendy@gmail.com

Latar Belakang Pendidikan

- 2000-2006 : SDN Pepelegi 2-Sidoarjo
- 2006-2009 : SMPN 1 Taman-Sidoarjo
- 2009-2012 : SMA Kemala Bhayangkari 1 Surabaya
- 2012-2015 : D3 Teknik Elektro ITS – Komputer Kontrol
- 2016-sekarang : S1 Teknik Elektro ITS – Teknik Sistem Tenaga

Pengalaman Kerja

- Kerja praktek di PT. Telkom Indonesia (Persero) (2014)
- PT. Gudang Garam, Tbk sebagai Teknisi (2015-2016)
- Kerja praktek di PT. Petrokimia Gresik (Persero) (2017)

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----